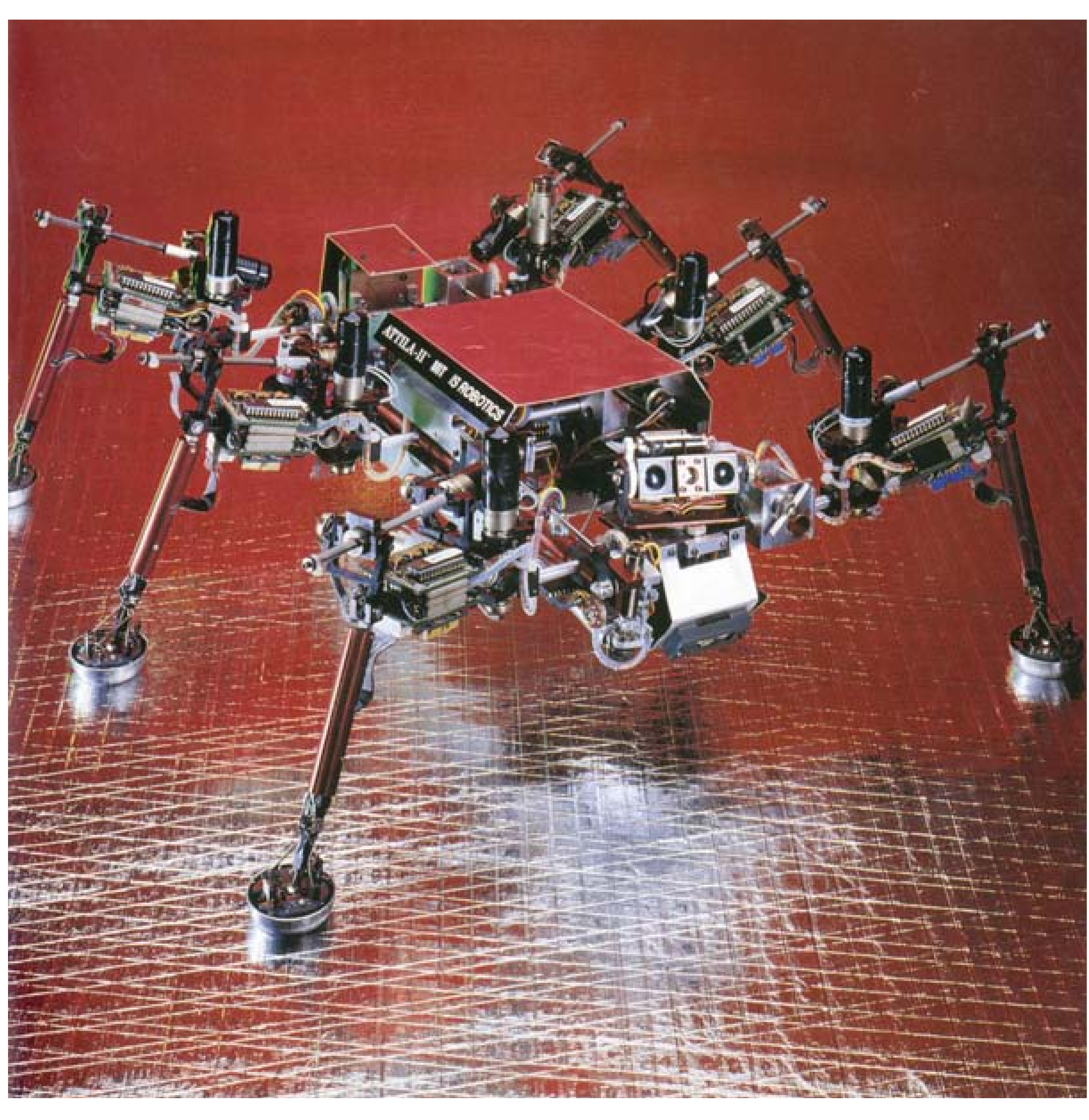
INVESTIGACION y CIENCIA

ONDAS DE GRAVEDAD EN LA CREACION DEL UNIVERSO

ECOSISTEMAS ANTARTICOS

MUJER Y CIENCIA: UN CASO HISTORICO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



INSECTOIDES

FEBRERO 1992
600 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Febrero de 1992 Número 185

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Jesús Alonso: *Combustibles procedentes del sol*; Ramón Pascual: *Cosmología cuántica y creación del universo*; Ramón Rama: *La célula madre*; Antonio Rodero: *Origen del montar a caballo*; Joandomènec Ros: *El pavo de matorral*; Luis Bou: *Sophie Germain*, *Bebés de silicio* y *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*.

Ciencia y sociedad:

Josep Enric Llebot, Juan P. Adrados, Ana Mª García, Joandomènec Ros y J. M. V. Martínez

Ciencia y empresa:

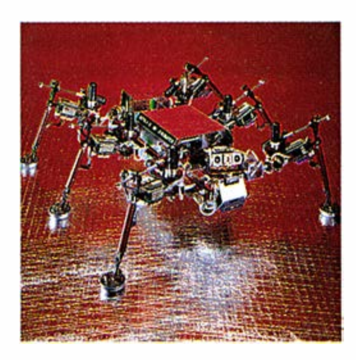
Manuel Puigcerver

Libros:

Antonio Domínguez, Jordi Agustí, Luis Alonso, Francesc Nicolau, Angel Romo y Antoni Malet

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6	Israel Dostrovsky
7	Joel Fishman/Black Star
8-9	Laurie Grace
10	Joel Fishman/Black Star (*arriba*), Thomas Stephan/Black Star (*abajo*)
11	Andrew Christie
13	Anglo-Australian Telescope Board; fotografía de David Malin
14-15	John Pinderhughes, Universidad de Texas en Austin; Granger Collection; Denver Post; Chase Ltd Photo; Edward Santalone; David Sams; Rick Friedman/Black Star
16	Jason Küffer
17-18	George Retseck
22-23	Tomo Narashima; David W. Golde (*recuadro*)
24-25	Shirley Quan, Universidad de California, Los Angeles, y David W. Golde
26-28	Patricia J. Wynne; David W. Golde (*recuadro*)
29	William Hocking, UCLA, Shirley Quan y David Golde (*izquierda*), Patricia J. Wynne (*derecha*)
49	Historical-Archaeological Experimental Centre, Lejre, Dinamarca
50	Moderne Galerie des Saarland-Museums (*arriba izquierda*), Instituto Ucraniano de Arqueología (*abajo izquierda*), Joe Le Monnier (*derecha*)
51	Linda Krause (*arriba; abajo izquierda*), David Anthony y Dorcas Brown (*recuadro*)
52	Jason Küffer; Linda Krause (*recuadro*)
53	Roland y Sabrina Michaud
55-59	Expogràfic,S.A., Josefina Castellví, Ramón Fontarnau y Jesús Guinea
62-63	Darryl Jones, Universidad de Griffith, Queensland
64	Roger S. Seymour (*arriba*), Jason Küffer (*abajo*)
65	Patricia J. Wynne (*arriba*), Jason Küffer (*abajo*)
66-67	Patricia J. Wynne
68	David Vleck, Univ. de Arizona
70	Steve Murez/Black Star
72	Archivo Bettmann (*arriba izda. y dcha.*) Archivos Springer-Verlag (*abajo izda.*)
73	Cortesía de The History of Science Collections, Biblioteca de la Universidad de Cornell; fotografía de Robert Prochnow
74	Laurie Grace
75	Art Resource
76-78	Matthew Mulbry
80	Louis Psihoyos/Matrix
82	Pat Davison
83	Peter Yates
84	Ian Worpole
85	David Sams
92-93	Andrew Christie



LA FOTOGRAFIA DE LA PORTADA nos presenta un insectoide, un robot que se mueve por reflejos. La máquina se está perfeccionando en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Los dos modelos existentes, Atila y Aníbal, exploran el laboratorio de inteligencia artificial del MIT; si se mira al futuro, se sueña con modelos refinados que recojan información de otros planetas. De sus posibilidades y limitaciones se ocupa el artículo de este mismo número "Bebés de silicio".

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46

OJD DIFUSION PUBLICIDAD

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «No decimos nada nuevo al afirmar que en la guerra que hoy libramos la protección civil es imprescindible, puesto que se trata de una guerra "definitiva", "total" o "absoluta". La cuestión es tan antigua como la humanidad. En realidad, los teutones ya nos han advertido de que uno de los objetivos de la conflagración es "la desaparición del pueblo vencido del escenario de la historia". He aquí por qué hemos de tener en cuenta la protección civil y salir al paso de la necesidad de perfeccionar la organización para reducir a mínimos los efectos de los ataques aéreos, prevenir la histeria y, ante todo, salvar vidas civiles.»

«Un cohete de uso militar podría obtener su energía de la combustión de alcohol o gasolina en oxígeno líquido. El motor no es más que una cámara de combustión provista de una tobera para la descarga de los gases quemados. Podría añadirse una cámara de control para gobernar sin cables el timón de dirección. Nada formidable hay en todo ello; pero es que un cohete es caro comparado con un proyectil de artillería.»

«Veamos ahora algunas de las posibles aplicaciones militares de los cohetes. Las actuales granadas antiaéreas de tres pulgadas no son muy eficaces y no alcanzan la altitud requerida. Pese a la tremenda concentración de cañones antiaéreos, los bombarderos alemanes fueron capaces de llegar a Londres una y otra vez. Ahora bien, un cohete parte del suelo a velocidad nula y se va acelerando mientras le queda combustible. Esto hace que pudiera diseñarse sin dificultad para alcanzar los treinta o cuarenta mil pies. ¿Habrá ahí un arma formidable contra los bombarderos enemigos? Los cohetes tuvieron una intervención importante en la destrucción de la flota con que Napoleón pretendía invadir Inglaterra. ¿Ocurrirá quizá que los proyectiles cohete terminen por convertirse en una especie de artillería de largo alcance?»

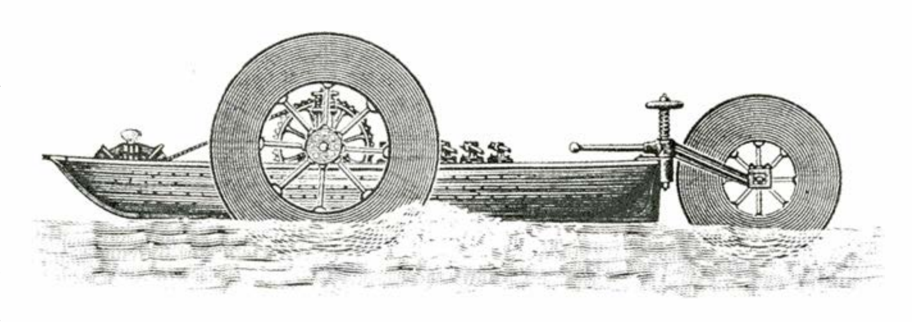
«Por último, los cohetes, si bien no sirven como propulsores dadas las velocidades actuales de los aviones, podrían emplearse para comunicar a éstos un gran empuje durante el despegue y así podríamos sobrecargar fuertemente nuestros bombarderos de largo alcance.»

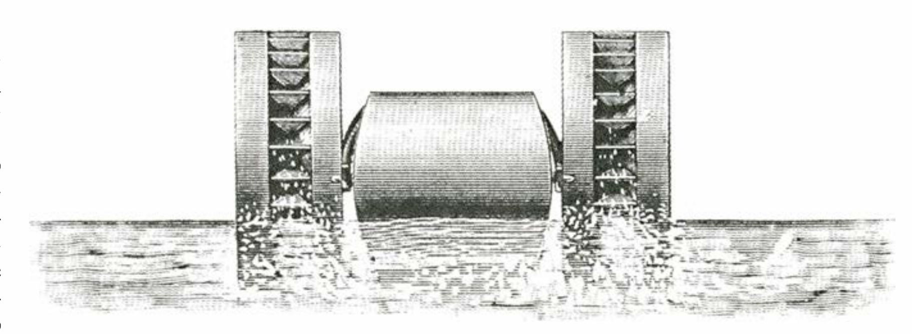
... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El profesor R. L. Garner se propone visitar Africa y convivir con los gorilas, provisto de los aparatos necesarios para aprender el habla de estos animales. Piensa instalarse en una jaula de hierro, grande y robusta, que lo mantenga a salvo de los ataques de tan poderosas fieras mientras escucha sus comentarios y los conserva en su fonógrafo. El profesor cree que podrá averiguar las ideas de los gorilas más eminentes con menor dificultad y más precisión de lo que es posible en el caso de algunas personalidades que hablan con gran desenvoltura acerca de temas fundamentales.»

«Henry Wilde, miembro de la Royal Society, ha llegado a la conclusión de que la corteza terrestre y la enorme masa que aquélla encierra giran más o menos independientemente una de otra. La porción interna, todavía en estado líquido, la concibe rotando en torno al eje que nuestro planeta tenía en su infancia. Sin que sepamos cómo, sigue opinando, en el gran cataclismo por el que la Luna salió despedida de la Tierra, la corteza de ésta se sesgó lateralmente unos veintitrés grados. Mr. Wilde es el constructor de una máquina compuesta de una esfera interior a otra ligeramente mayor, imanadas ambas mediante espiras de alambre conductor arrolladas en su torno. Representa los océanos con chapas de hierro magnetizadas colocadas en los lugares correspondientes. Ambas esferas las hace rotar alrededor de sendos ejes separados 23,5 grados. Finalmente, para los ensayos, con una aguja magnética, en cualquier punto del globo, produce una inmovilización temporal. Con este ingenioso dispositivo, se declara capaz de reproducir cualquier variación conocida de la intensidad y dirección del magnetismo terrestre de la que pueda hallar testimonio escrito. Lo más convincente del experimento es que, cuando el giro de la esfera interna se retrasa, con respecto a la externa, a razón de 22,5 minutos de arco anuales, reproduce hasta el menor detalle la historia real de los últimos cuatro siglos del magnetismo de todos los puntos del mundo, o al menos la historia que él conoce de ese magnetismo.»

«A Mr. Gustave Trouvé le ha impresionado siempre la gran diferencia que se observa entre las velocidades de las locomotoras y los barcos. Atribuye la evidente inferioridad cinemática de éstos a la enorme resistencia que opone el agua. Pero, ¿necesitan realmente sus propios órganos ambas funciones de sustentación y propulsión? Al objeto de resolver estos problemas, Mr. Trouvé diseñó el aparato cuyas vistas lateral y frontal se muestran en la figura.»





Barco eléctrico con propulsión y flotación combinadas

Combustibles procedentes del sol

La producción de combustibles químicos a partir de la luz solar ofrece una forma de energía susceptible de ser transportada y almacenada, superando las limitaciones de la conversión directa de la energía solar en electricidad

Israel Dostrovsky

Por ser limitada la cantidad reservada de combustibles fósiles, importa sobremanera encontrar fuentes de energía alternativas. La búsqueda se hace aún más apremiante tras comprobar que la quema continua de combustibles fósiles pone en peligro el clima terrestre debido a la emisión de dióxido de carbono que, al retenerlo la atmósfera, contribuye al calentamiento general (efecto invernadero). La nueva energía ha de ser renovable, estar disponible en cuantía suficiente para atender la demanda mundial e inocua para el entorno. Sólo conocemos una fuente de energía que reúna tales características: el sol.

A primera vista, la energía solar parece ser una solución ideal.. La cantidad total de radiación solar que llega en un año a la superficie terrestre es de unos 3,9 millones de exajoules (el exajoule equivale a un trillón de joules, la energía calorífica aproximada que liberaría la combustión de 22 millones de toneladas de petróleo). Habida cuenta que el consumo anual de energía en el mundo totaliza 350 exajoules, para atenderlo bastaría recoger, con un rendimiento no superior al 10%, la energía de los rayos solares que inciden sobre el 0,1% de la superficie terrestre. Si bien esta afirmación se ha simplificado en demasía, un examen más detenido confirma el punto básico: la energía solar podría suministrar con facilidad al menos 450 exajoules al año, aunque solamente se tomara de una pequeña fracción de las zonas desérticas que reciben la mayoría de la luz solar.

Al llegar aquí, es preciso afrontar dos problemas: primero, las regiones de mayor insolación no coinciden con las aglomeraciones urbanas e industriales, donde es máxima la demanda de energía; segundo, la energía solar es de carácter intermitente. Estos problemas entrañan la necesidad de desarrollar procesos para recoger la energía solar en gran escala y convertirla a formas apropiadas para el almacenamiento a largo plazo y la transmisión a largas distancias. No se cuenta todavía con medios satisfactorios para conseguir tales objetivos, a causa, en parte, de la exigüidad de los recursos dedicados a este sector de investigación. Sirva como ejemplo que la Agencia Internacional de la Energía, a la par que asigna más del 60% de su presupuesto de investigación a proyectos relativos a la energía nuclear, reserva menos del 4% para la investigación en energía solar.

ISRAEL DOSTROVSKY se crió en Jerusalén y recibió allí su educación primaria y secundaria, trasladándose luego al University College de Londres, donde se doctoró en química física en 1943. Enseñó química en el University College de North Wales hasta 1948, año en que se incorporó al nuevo Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, para establecer el departamento de investigación de isótopos. De 1971 a 1975 fue vicepresidente y presidente del Instituto, y director del centro de investigación de la energía desde 1980 hasta 1990. Ha encabezado también el Consejo Nacional de Investigación y de la Comisión de Energía Atómica del Estado de Israel.

La mayor parte de esta limitada investigación se concentra en la conversión de la luz solar en electricidad, principalmente mediante procedimientos fotovoltaicos y térmicos. En la conversión fotovoltaica, unos dispositivos de estado sólido transforman la radiación solar directamente en electricidad, proceso por el cual se suministra energía a multitud de satélites espaciales. La conversión térmica, en cambio, pasa por la etapa intermedia de convertir la radiación del sol en calor, el cual sirve para mover turbinas de vapor y generadores eléctricos. El ejemplo más importante de tal aplicación se encuentra en Daggett, California, donde una planta diseñada por la firma israelí LUZ International genera 400 megawatts de energía eléctrica.

Aunque la electricidad constituya la forma clave de distribución de energía —de hecho, le corresponde un tercio de la energía primaria mundial— no da respuesta a todos los problemas que entraña el uso de la energía solar. En efecto, no puede almacenarse de un modo conveniente y su transporte a grandes distancias crea otra serie de dificultades. No bastará, pues, con desarrollar la electricidad solar, sino que habrán de encontrarse otros vectores de energía.

Pueden satisfacerse ambas necesidades de almacenamiento y de transporte mediante un proceso que recoja la energía solar y la acumule convertida en un producto químico. Muchos de tales compuestos pueden ser transportados por tubos y almacenados en forma gaseosa, líquida o sólida con el fin de utilizarse luego como combustibles para propulsar maquinaria, mientras que otros pueden también servir para generar electricidad directamente. Esta



1. TORRE SOLAR del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, Israel. Concentra la luz solar para obtener el calor que provoque las reacciones productoras de combustibles químicos. Se han construido otras instalaciones de esta clase, capaces de suministrar más de un millón de watts.

producción de combustibles químicos mediante procesos inducidos por la luz del sol podría resolver las crisis de energía y de deterioro ambiental que nos amenazan.

Son numerosos los intentos de producción de combustibles químicos por acción solar que se han centrado en el hidrógeno, gas ligero y combustible que puede fácilmente obtenerse por electrólisis del agua y es apto para almacenarse y transportarse a gran distancia. Al arder, el hidrógeno produce agua, y por ello es un combustible de "emisión cero", aunque sólo pueda considerarse inocuo para el ambiente si la electricidad utilizada para producirlo proviene de fuentes no fósiles, tales como la luz solar, el agua o el viento. Un sistema de esta clase está ahora en fase de demostración en Arabia Saudita, integrado en el proyecto HYSOLAR, realizado conjuntamente por aquel país y Alemania. En tal proyecto, un generador fotovoltaico de 350 kilowatts se acopla a una planta que produce hidrógeno por electrólisis.

El rendimiento total de la producción electrolítica de hidrógeno se calcula combinando el rendimiento de generar la electricidad a partir de la fuente renovable en cuestión y el rendimiento del propio proceso de electrólisis, factores en cuya mejora se ha trabajado mucho en los últimos años. Hoy día, se alcanza una eficiencia al 12% en la generación comercial de electricidad a partir de rayos solares, y alrededor del 70% en la electrólisis del agua, por lo que el valor total resultante se aproxima al 8%. Cuando den fruto los diversos proyectos en curso para desarrollar plantas de energía solar más eficientes, adquirirá un mayor atractivo el combustible de origen solar obtenido por electrólisis.



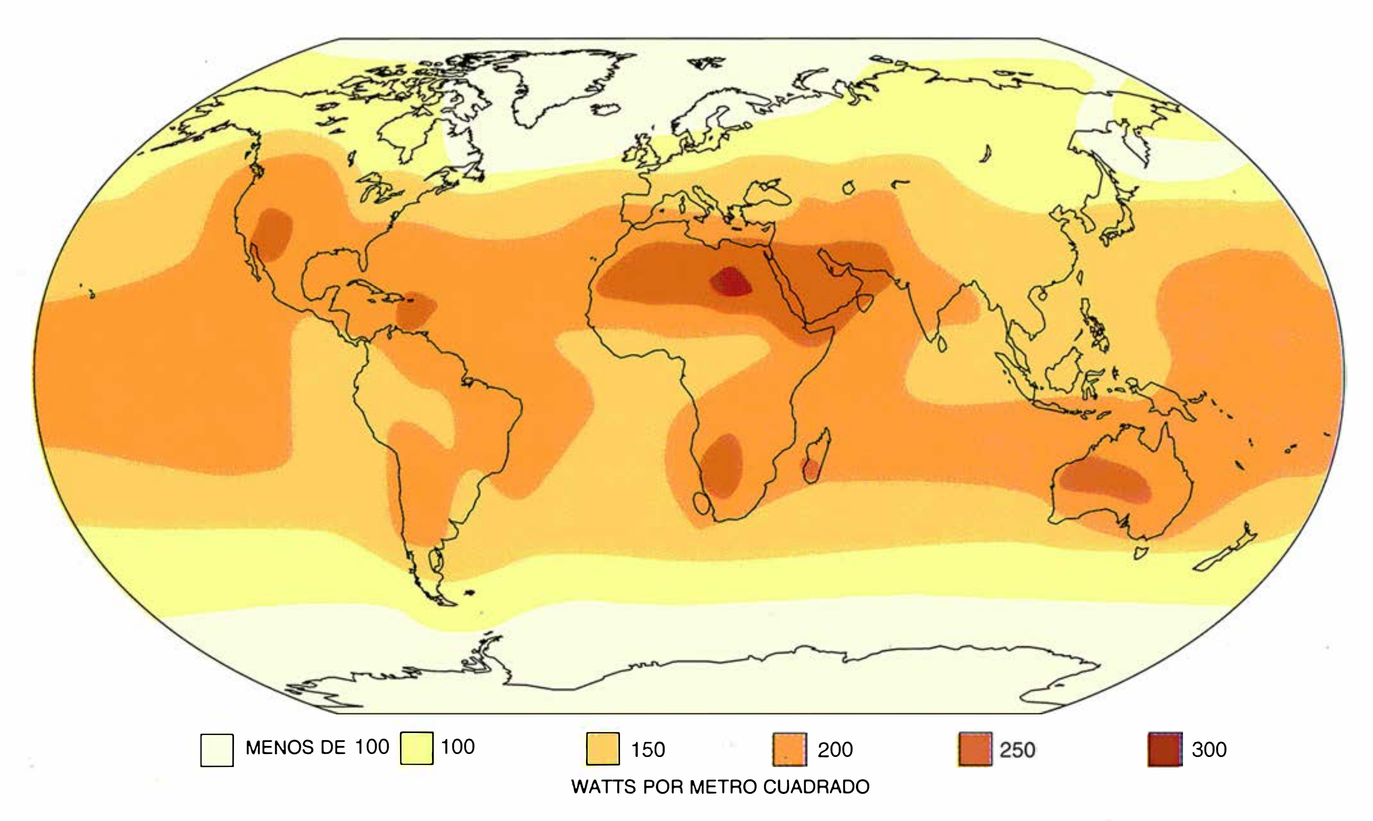
En la medida en que la energía hidroeléctrica se tome como una forma indirecta de energía solar, las grandes cantidades de hidrógeno producido por electrólisis en ciertos países (especialmente Noruega y Canadá) se pueden considerar como ejemplo de combustible obtenido a partir del sol. Sin embargo, el hidrógeno es allí utilizado por la industria química como materia prima para la síntesis del amoníaco, y no como vector energético.

Los problemas que entraña la mejora del proceso electrolítico para llegar a producir hidrógeno en grandes cantidades han espoleado la búsqueda de otros caminos para lograr tal producción, incluyendo en ellos distintos sistemas químicos que no dependen de la generación de electricidad como fase intermedia.

En teoría, es posible obtener hidrógeno del agua por el simple calentamiento de ésta a elevada temperatura; en efecto, por encima de los 2000 grados Celsius el vapor de agua tiene un contenido apreciable de hidrógeno, y tales temperaturas se alcanzan fácilmente mediante concentración de la radiación solar. Sin embargo, lo difícil en este proceso es impedir que el hidrógeno y el oxígeno se recombinen al enfriarse el vapor, para lo cual habrá que separar ambos productos cuando la temperatura es todavía elevada. No es materia trivial el desarrollo de un proceso de separación que dé resultados prácticos a temperaturas superiores a 2000 grados. No se ha cerrado todavía la investigación en ese campo.

La mayor parte del hidrógeno que hoy consume la industria se obtiene de los hidrocarburos (carbón, gas natural o componentes del petróleo), mediante procesos que toman un combustible fósil como fuente de energía, razón por la que presentan un escaso interés en el contexto actual. El panorama cambia, no obstante, cuando se considera la biomasa —denominación general de la materia vegetal— como sustitutivo de los hidrocarburos en alguno de estos procesos. Es la energía solar la que, a través de la fotosíntesis, produce la biomasa, por lo que tomando ésta como materia prima y la radiación solar como fuente de energía se obtendría un sistema con las características deseadas.

Esta aplicación de la energía solar se basa en que, al calentarse un material orgánico que contiene carbono a temperatura suficientemente elevada (de 700 a 900 grados C), en presencia de vapor de agua y ausencia de aire, se descompone y origina una mezcla gaseosa de hidrógeno y monóxido de



2. CANTIDAD MEDIA DE LUZ SOLAR (watts por metro cuadrado) que incide sobre una zona horizontal de la superficie terrestre, a lo largo de 24 horas. Por su abundancia, la radiación solar constituye una fuente energética obvia, pero su explotación práctica requiere transformarla.

carbono. Este gas tiene un bajo poder calorífico, pero da un calor adecuado para generar vapor o electricidad.

Mayor importancia tiene para el presente análisis la posibilidad de ajustar la composición del gas mencionado de modo que se obtenga lo que en la industria se denomina gas de síntesis ("syngas"), es decir, una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono en proporción comprendida entre 2:1 y 3:1. Como indica su nombre, a partir del "syngas" puede sintetizarse una gran variedad de compuestos, entre ellos los combustibles líquidos como el metanol y la gasolina, además del hidrógeno puro.

La práctica actual consiste en conseguir la enorme cantidad de calor que la gasificación requiere quemando una porción considerable de la propia materia orgánica. La utilización del calor obtenido de fuentes solares, bastante sencilla por lo demás, elevaría a más del doble la producción de "syngas" y de cualquier material o combustible que se consiga a partir del mismo. El dióxido de carbono generado cuando se quema o fermenta materia vegetal no se añade, sin embargo, a la atmósfera, sino que se recicla: el proceso retorna a la atmósfera material que le ha sido arrebatado recientemente.

El proceso de gasificación puede aplicarse a materiales que contengan carbono y no pertenezcan a la biomasa: por supuesto, a casi todos los combustibles fósiles, sean o no los acostumbrados. En tales procesos, la combustión de sustancias obtenidas del "syngas" aporta nuevo dióxido de carbono a la atmósfera y, por tanto, contribuye al efecto invernadero. Pero, también aquí, si el sol es la fuente de calor para la gasificación y el tratamiento subsiguiente, la cantidad efectiva de materias primas se habrá elevado a más del doble, reduciendo por tanto a menos de la mitad la emisión

Producción de hidrógeno en reacciones con dióxido de azufre

El hidrógeno puede servir como combustible químico. La primera etapa de su producción, común a todos los procesos siguientes, puede ser conducida por la luz solar.

• Puede generarse hidrógeno en una serie de reacciones donde interviene el dióxido de azufre (SO_2) formado durante la descomposición a altas temperaturas del ácido sulfúrico (H_2SO_4):

$$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + 1/2 O_2$$

Un método de producir hidrógeno mediante el dióxido de azufre, desarrollado en General Atomics de San Diego, California, implica la adición de iodo (I_2):

$$I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2IH + H_2SO_4$$

La posterior descomposición de las moléculas del ioduro de hidrógeno (IH) libera hidrógeno:

$$2HI \rightarrow H_2 + I_2$$

• Un segundo proceso (electrolítico) para producir hidrógeno fue desarrollado en Westinghouse:

$$SO_2 + 2H_2O \rightarrow H_2SO_4 + H_2$$

La ventaja de este proceso es que solamente requiere aplicar un voltaje de 0,29 volt, muy inferior a los aproximadamente dos volts que se necesitan para producir hidrógeno directamente por electrólisis del agua.

• Un tercer proceso, también electrolítico, fue elaborado en los Laboratorios Ispara, en Italia, haciendo intervenir al bromo (Br_2):

$$Br_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HBr + H_2SO_4$$

La aplicación de 0,62 volt a las moléculas de bromuro de hidrógeno (HBr) libera hidrógeno:

$$2BrH \rightarrow H_2 + Br_2$$

de dióxido de carbono por unidad de combustible consumido.

Se presenta una aplicación de especial interés de tecnologías semejantes relacionada con los problemas del almacenamiento a largo plazo y la transmisión a grandes distancias de la energía solar. En los años setenta, los técnicos de Kernforschungsanlage Juelich GmbH (KFA), centro de investigación nuclear en Alemania, propusieron y ensayaron un método enteramente nuevo para convertir el calor que desprende la planta nuclear en un producto químico, adecuado para uso comercial e industrial.

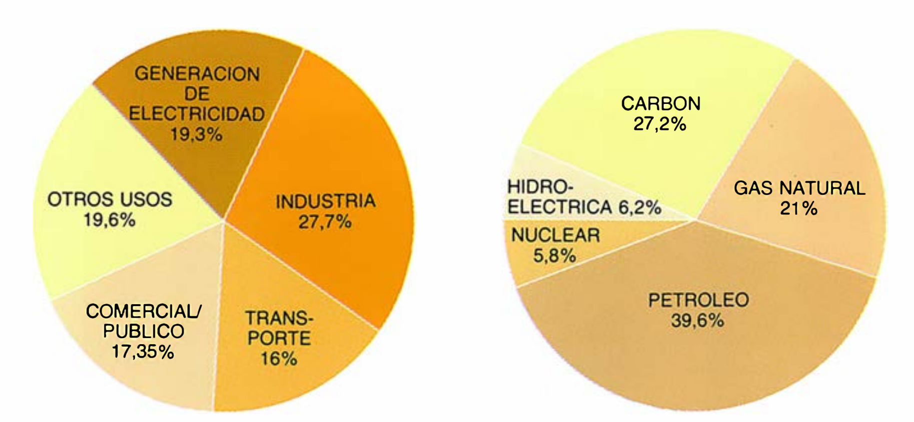
El trabajo partió de las mismas premisas aplicables hoy en día a la energía solar: a saber, la necesidad de transportar el calor desde su lugar de producción hasta los consumidores y el deseo de abastecer a un sector del mercado energético más amplio del que puede atenderse con la electricidad por sí sola.

En vez de confiar en un combustible único, el hidrógeno, que sería generado en el reactor nuclear, transmitido al consumidor y a continuación quemado, el equipo de KFA se dedicó a buscar un sistema químico reversible, esto es, un sistema capaz de absorber una gran cantidad de calor para producir compuestos que puedan luego ser transportados a cualquier distancia y entregados a los consumidores. Estos, a su vez, invertirían la reacción, recuperando el calor y regenerando las sustancias químicas originales, que tornarían después al reactor. Los expertos denominaron a su creación "tubería de calor termoquímica".

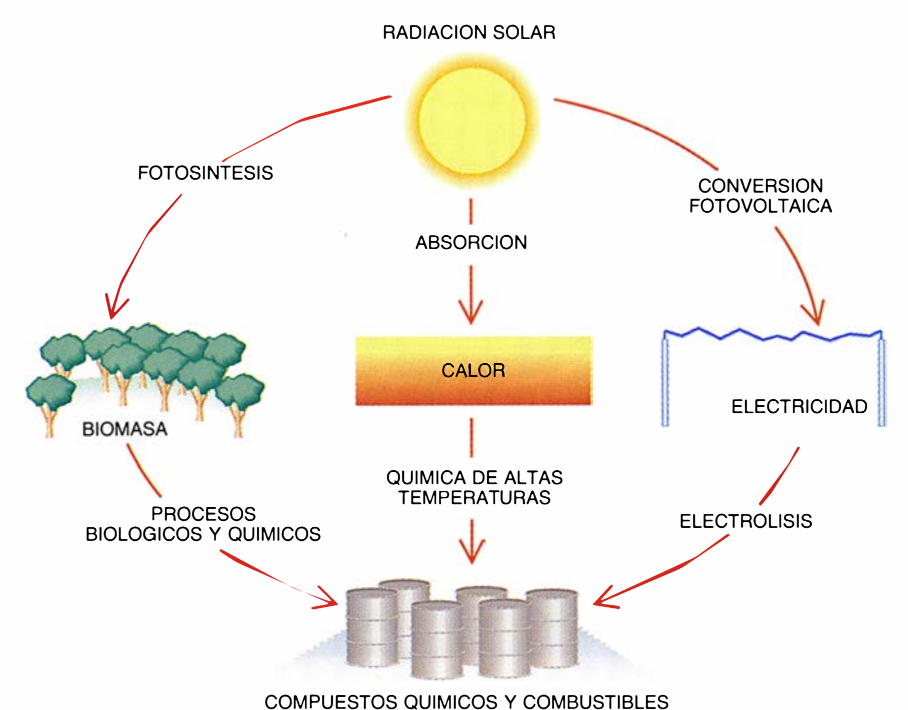
Si bien son varios los sistemas químicos que podrían emplearse en un tubería de calor de ésos, no todos son igualmente convenientes. El grupo de KFA escogió la reacción de reformación de vapor, proceso bien conocido en la industria petroquímica, en la cual el metano reacciona con el vapor, a elevada temperatura y en presencia de un catalizador, para producir una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono: el mismo gas de síntesis al que hemos aludido antes. Dicho "syngas" puede ser almacenado indefinidamente a la temperatura ambiente y suministrado luego al consumidor a través de tuberías. El consumidor provoca entonces la reacción de esta mezcla, nuevamente con ayuda de catalizadores, obteniendo de ella calor que se aplica a la finalidad que él desee, más los compuestos químicos originales que se devuelven al reactor de reformación. Se verificaron ensayos de este proceso utilizando un generador eléctrico de calor en lugar del reactor nuclear, y se consiguieron potencias superiores a 10 millones de watts. (No fue posible probarlo con un reactor por interponerse la restricción general propia de la industria nuclear.)

El concepto de tubería de calor termoquímica, aplicado a la energía solar, es objeto de investigación en el Instituto Weizmann de Ciencias (Rehovot) y en el Centro de Investigación Aeroespacial de Alemania. Para ello se analizan las reacciones entre metano y vapor de agua, y entre metano y dióxido de carbono, ambas realizadas a temperaturas comprendidas entre 900 y 1000 grados C en la superficie de catalizadores sólidos, que suelen contener níquel o rodio. La alta temperatura requerida para accionar los reformadores se obtiene por concentración de los rayos solares. Por tratarse de un proceso de ciclo cerrado, no se consumen materiales ni se emiten subproductos a la atmósfera. El sistema cuenta con una gran ventaja: sus tres funciones —captación de la energía solar y su conversión en energía química, almacenamiento de la energía, y utilización final de la misma para generar electricidad o suministrar calor para procesos industriales— pueden tener lugar en diferentes emplazamientos, respectivamente óptimos para la función correspondiente.

La radiación solar concentrada que necesitan todos estos procesos puede obtenerse fácilmente por medio de espejos dispuestos en configuraciones diversas. Las tecnologías a utilizar incluyen las de horno solar, concentrador

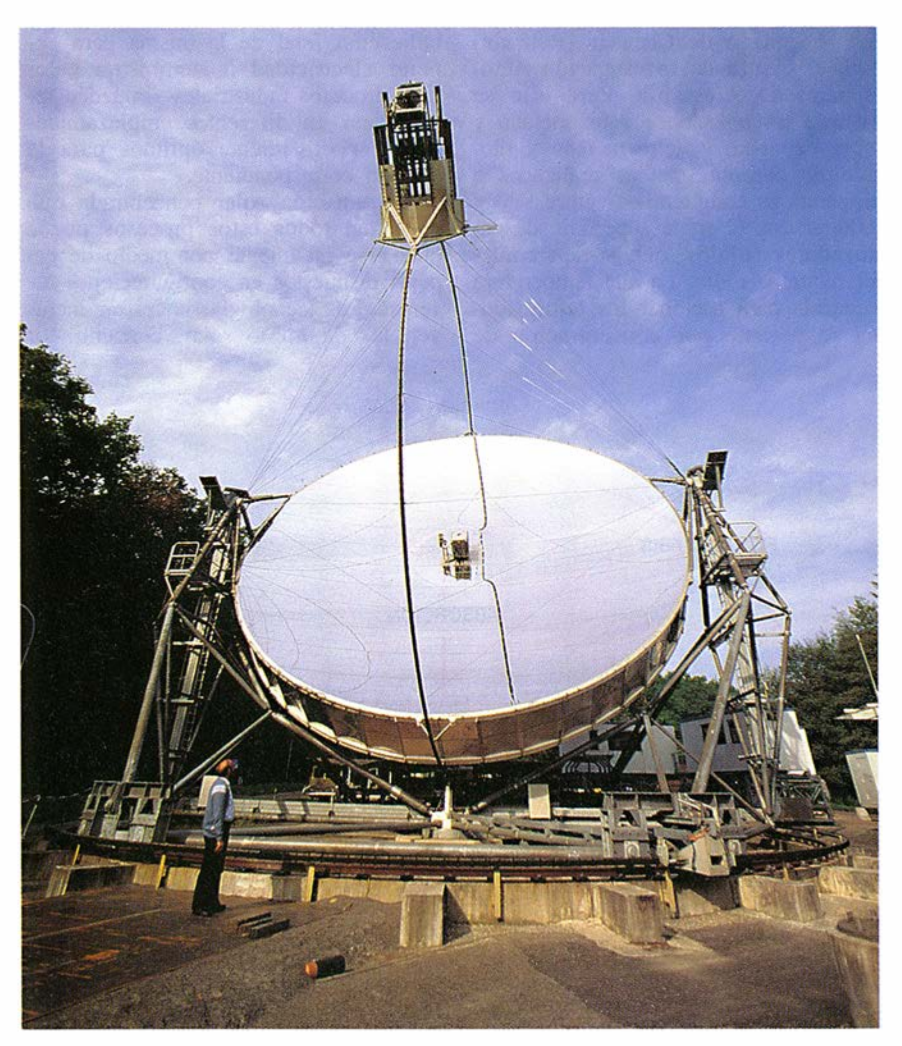


3. PROPORCIONES MUNDIALES de las diversas fuentes de energía (*derecha*) y principales fines para los que se utilizan (*izquierda*). Se aprecia que la electricidad supone solamente un tercio de la energía primaria distribuida.



4. LA ENERGIA SOLAR puede transformarse en varios compuestos y combustibles químicos, siguiendo tres métodos que aquí se ilustran.





5. LA LUZ SOLAR CONCENTRADA puede obtenerse de un horno solar (*arriba*) o de un plato solar (*abajo*). El horno, situado en el Instituto Weizmann, multiplica hasta 10.000 veces la radiación recibida en la Tierra y puede suministrar decenas de miles de watts. El plato, operado por el Centro de Investigación Aeroespacial de Alemania cerca de Stuttgart, genera hasta 150.000 watts.

de plato y torre solar, dependiendo la elección entre ellas de la cantidad de potencia que se desee. Así, los hornos solares pueden producir potencias de decenas de kilowatts, de centenares de kilowatts los platos, y del orden de los millares las torres solares. Estas últimas, en su versión comercial, aspiran a alcanzar niveles de potencia de centenares de megawatts; las que ahora funcionan experimentalmente generan de tres a cinco megawatts.

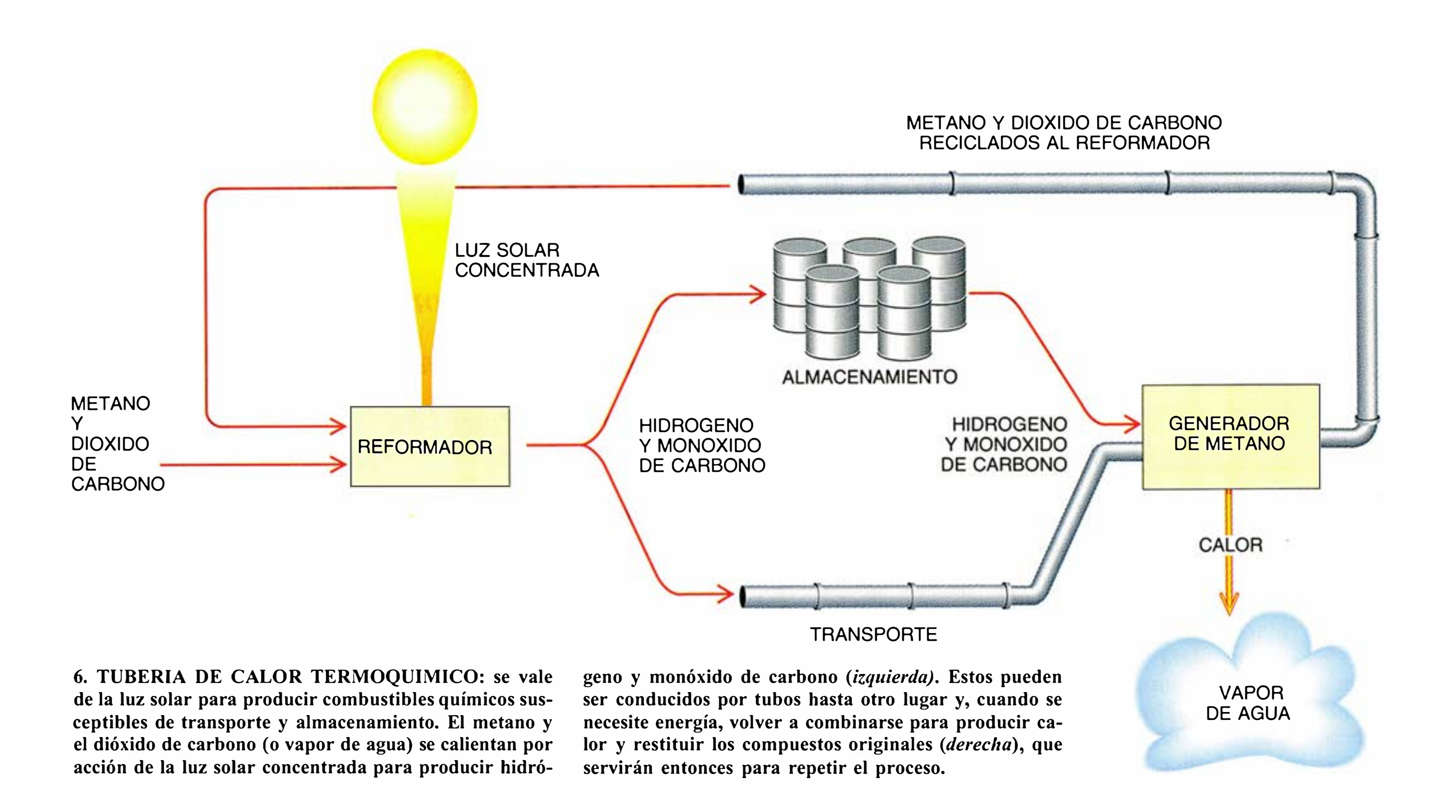
Sea cual fuere el medio de concentrar los rayos del sol, quizás el modo más elegante de entregar la energía solar para provocar las reacciones sea el de iluminar directamente los catalizadores con luz solar concentrada. En uno de los procedimientos, la luz pasa al reactor químico (reformador) en un solo sentido a través de una ventana, que evita así el contacto del contenido del reactor con la atmósfera; el principal obstáculo de esta técnica es el tamaño de ventana que sería necesario para el funcionamiento a gran escala.

En otro método diferente, que permite prescindir de la ventana pero en cambio viene afectado por una introducción menos directa de la energía solar en la mezcla reactiva, se encierra dicha mezcla en tubos y éstos se calientan luego desde el exterior con radiación solar. Este procedimiento se ha probado con éxito en la Instalación de Horno Solar Schaefer del Instituto Weizmann, y se está construyendo una versión a mayor escala con 400 kilowatts de potencia en la Espira Solar Familiar Kay del mismo lugar.

Con el fin de proteger del sobrecalentamiento los tubos al tiempo que se asegura un control fácil y uniforme del suministro de energía, la radiación solar se acopla al medio químico reactivo a través de un medio de transferencia de calor separado. Fueron los Laboratorios Nacionales Sandia en Albuquerque quienes primero propusieron bañar los tubos de reacción con vapores de sodio a su temperatura de ebullición, calentados por luz solar concentrada, de modo que dichos tubos se mantengan a temperatura constante. Un equipo conjunto de Sandia y el Instituto Weizmann realizó en el ya citado Horno Solar Schaefer pruebas de tal idea, que se vieron coronadas por el éxito.

También el aire sirve de medio transmisor de calor, para lo cual se le hace circular a través de una camisa que envuelve los tubos. En Israel y en España se están probando varios diseños de sistemas de transferencia de calor de este tipo.

En varios laboratorios, sobre todo en Israel, Alemania, España y los Es-



6. TUBERIA DE CALOR TERMOQUIMICO: se vale de la luz solar para producir combustibles químicos susceptibles de transporte y almacenamiento. El metano y el dióxido de carbono (o vapor de agua) se calientan por acción de la luz solar concentrada para producir hidrógeno y monóxido de carbono (*izquierda*). Estos pueden ser conducidos por tubos hasta otro lugar y, cuando se necesite energía, volver a combinarse para producir calor y restituir los compuestos originales (*derecha*), que servirán entonces para repetir el proceso.

tados Unidos, se están desarrollando otros sistemas capaces de calentar el aire a elevadas temperaturas por medio de la energía solar. En todos los procedimientos se hace circular el aire sobre extensas superficies calentadas con radiación solar concentrada, superficies que pueden ser rejillas de alambre, cerámica esponjosa, cerámica alveolar o partículas en suspensión. Si se opera a presión, las ventanas son necesarias, y no lo son cuando puede utilizarse aire a la presión atmosférica, en cuyo caso el diseño se simplifica notablemente.

Se puede comprender lo mucho que nos jugamos en este terreno si pensamos en que el acertado desarrollo de los procesos anteriores asegurará un vasto suministro de energía no contaminante que durará mientras el sol siga brillando.

Líneas de investigación en España

En España, durante los últimos cinco años, la obtención de combustibles a partir de la radiación solar se ha centrado en dos puntos fundamentales: la fotodescomposición catalítica del agua y el proceso de reformado de metano, considerados, en su momento, viables económica y tecnológicamente a no demasiado largo plazo.

Por lo que respecta al primero de los procesos, se lleva a cabo en un proyecto conjunto entre el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Politécnica de Barcelona y la División Termosolar del Instituto de Energías Renovables del CIEMAT. En él, se pretende la obtención de hidrógeno a partir de agua mediante su fotodescomposición en presencia de un catalizador. Sus objetivos fundamentales se han centrado en el diseño del reactor y la mejora de los catalizadores empleados. Entre los catalizadores ensayados están CdS, CdS/CuS, TiO_2,... algunos sometidos a diferentes tratamientos físico-químicos. Los resultados cosechados no han sido todo lo buenos que se esperaba, aunque siguen realizándose investigaciones para mejorar los catalizadores.

Por otro lado, desde 1986 viene desarrollándose, en la Plataforma Solar de Almería, el proyecto hispano-alemán ASTERIX, en el cual la parte española está representada por el CIEMAT. Se trabaja en un reactor de reformado de metano que rinda una potencia de 1 megawatt. Para ello se utiliza la Central de Torre de la Plataforma como receptor de luz solar concentrada. El receptor está compuesto por tubos cerámicos por los que circula aire que se extrae a 9 bares de presión y una temperatura superior a 1100 grados C. Este aire caliente se hace circular por camisas que rodean las tuberías donde tiene lugar la conversión de mezcla de metano y agua en el gas de síntesis (mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono) catalizada por óxido de níquel.

El gas de síntesis obtenido puede aprovecharse para la formación de hidrógeno o cualquier otro combustible, así como emplearse en un tubería de calor termoquímica. El aspecto más novedoso del diseño es que se trata de un reactor de convección, que, al no emplear directamente la radiación solar concentrada para producir la reacción, ofrece mayor viabilidad técnica. Recientemente se ha terminado la campaña de ensayos de este diseño, y están en fase de elaboración los resultados finales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SOLAR THERMAL CENTRAL RECEIVER SYSTEMS. Dirigido por M. Becker. Springer-Verlag, 1987.

ENERGY AND THE MISSING RESSOURCE. I. Dostrovsky. Cambridge University Press, 1988.

HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER: TECHNOLOGIES, SYSTEMS, ECONOMY. Dirigido por Carl-Jochen Winter y Joachim Nitsch. Springer Verlag, 1988.

SOLAR THERMAL TECHNOLOGY: RESEARCH AND DEVELOPMENT AND APPLICATIONS. Actas del Cuarto Simposio Internacional, Nuevo México, 1988. Dirigido por B. P. Gupta. Hemisphere Publications, 1990.

Cosmología cuántica y creación del universo

Aplicando la mecánica cuántica al conjunto del universo los cosmólogos esperan ver más allá del propio instante de la creación

Jonathan J. Halliwell

Muchos de nosotros al contemplar el firmamento en una noche clara nos hemos preguntado por el origen de todo ese esplendor. Durante siglos esta pregunta, debatida por filósofos y teólogos, sobrepasaba el alcance de la investigación científica, y sólo en esta centuria se han elaborado teorías de vigor y sutileza suficientes para proporcionar una imagen plausible del propio comienzo del universo. Explorando hacia atrás en el tiempo la teoría de la relatividad general de Einstein, los investigadores dedujeron que el universo surgió de una única región increíblemente pequeña, densa y caliente. Los sucesos ocurridos a partir de entonces, incluyendo la formación de la materia, así como su condensación en galaxias, estrellas, planetas y sistemas químicos, resultan adecuadamente descritos mediante la cosmología convencional.

No obstante, los conceptos convencionales son incompletos, y no logran explicar, ni siquiera describir, el origen último del universo. La más extrema extrapolación hacia atrás en el tiempo reduce el universo a un tamaño tal que exige recurrir a ese otro enfoque esencial de la física moderna que es la teoría cuántica, con el problema que supone armonizar esta teoría con la relatividad general: maridaje forzado que no ha llegado a consumarse y que sigue siendo una de las grandes cuestiones pendientes de la física.

En los últimos decenios se han dado los primeros pasos en la aplicación de la teoría cuántica al universo, suficientemente prometedores como para alentar a sus artífices a acuñar para su empresa el nombre de cosmología cuántica. Los científicos de esta nueva disciplina se apoyan en las bases establecidas en los años sesenta por Bryce S. DeWitt, de la Universidad de Texas en Austin, Charles W. Misner, de la Universidad de Maryland, y John A. Wheeler, de la Universidad de Princeton, cuyos estudios configuraron la aplicación de la mecánica cuántica al universo entero. Sin embargo, este trabajo no se tomó muy en serio hasta los ochenta, cuando las teorías cosmológicas clásicas empezaron a fracasar como explicación plena del inicio del universo.

Los investigadores más notables dedicados a esta tarea son James B. Hartle, de la Universidad de California en Santa Bárbara, Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, Andrei D. Linde, del Instituto de Física Lebedev de Moscú, y Alexander Vilenkin, de la Universidad de Tufts, quienes han propuesto leyes muy definidas para las condiciones iniciales, es decir, las condiciones que han tenido que existir en el momento mismo de la creación. Unidas a las leyes adecuadas que gobiernan la evolución del universo, tales propuestas pueden verosímilmente conducir a una explicación completa de todos los fenómenos cosmológicos observados y, por tanto, resolver los importantes problemas que amenazan a los fundamentos de la cosmología clásica.

Protagonista del escenario convencional es el modelo de la gran explosión ("big bang") del universo. Desde que la propusiera por primera vez, George Gamow, en 1948, la idea de una explosión inicial ha rebatido con éxito otras teorías relativas al origen del universo, al tiempo que otros investigadores iban refinando el modelo en los años que transcurrían. Aplicando la relatividad general y algunas leyes físicas básicas, el modelo en su concepción actual sitúa el origen en un estado inicial de sumo calor y enorme densidad, con dimensiones ínfimas, hace unos 15.000 millones de años. Posteriormente el universo se expandió, convirtiéndose en el inmenso y frío cosmos que hoy observamos.

El modelo antes descrito permite hacer predicciones concretas sobre el universo que conocemos: a saber, la formación de los núcleos, las abundancias relativas de ciertos elementos y la existencia y temperatura exacta de la radiación de fondo de microondas, residuo de la explosión inicial que invade el universo. La predicción de la radiación cósmica de fondo realizada por Ralph A. Alpher, de Union College, y Robert Herman, de la Universidad de Texas en Austin, fue confirmada por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, de los laboratorios Bell, en 1964.

Pese a sus aciertos, el modelo de la gran explosión caliente deja sin explicar muchas características del universo. Por ejemplo, el universo actual incluye un enorme número de regiones que en el referido modelo nunca podrían haber tenido relación causal en ninguna fase de toda su historia. Estas regiones se están separando a tal velocidad, que ninguna información, aunque se desplazara a la velocidad de la luz, podría cubrir la distancia entre ellas. Este "problema del horizonte"

JONATHAN J. HALLIWELL es investigador del Centro de Física Teórica del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Antiguo alumno de Stephen W. Hawking, Halliwell se doctoró por la Universidad de Cambridge en 1986. Ha trabajado en el Christ's College de Cambridge y en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de California en Santa Bárbara. Su investigación está enfocada a la cosmología cuántica y a la gravedad cuántica.

1. CUMULO DE GALAXIAS Abell 1060, rico en galaxias espirales y elípticas. La aparición de las galaxias es uno de los fenómenos celestes que la cosmología clásica no acierta a explicar satisfactoriamente. La cosmología cuántica puede aportar los conceptos que faltan.

hace difícil explicar la sorprendente uniformidad de la radiación de fondo cósmica.

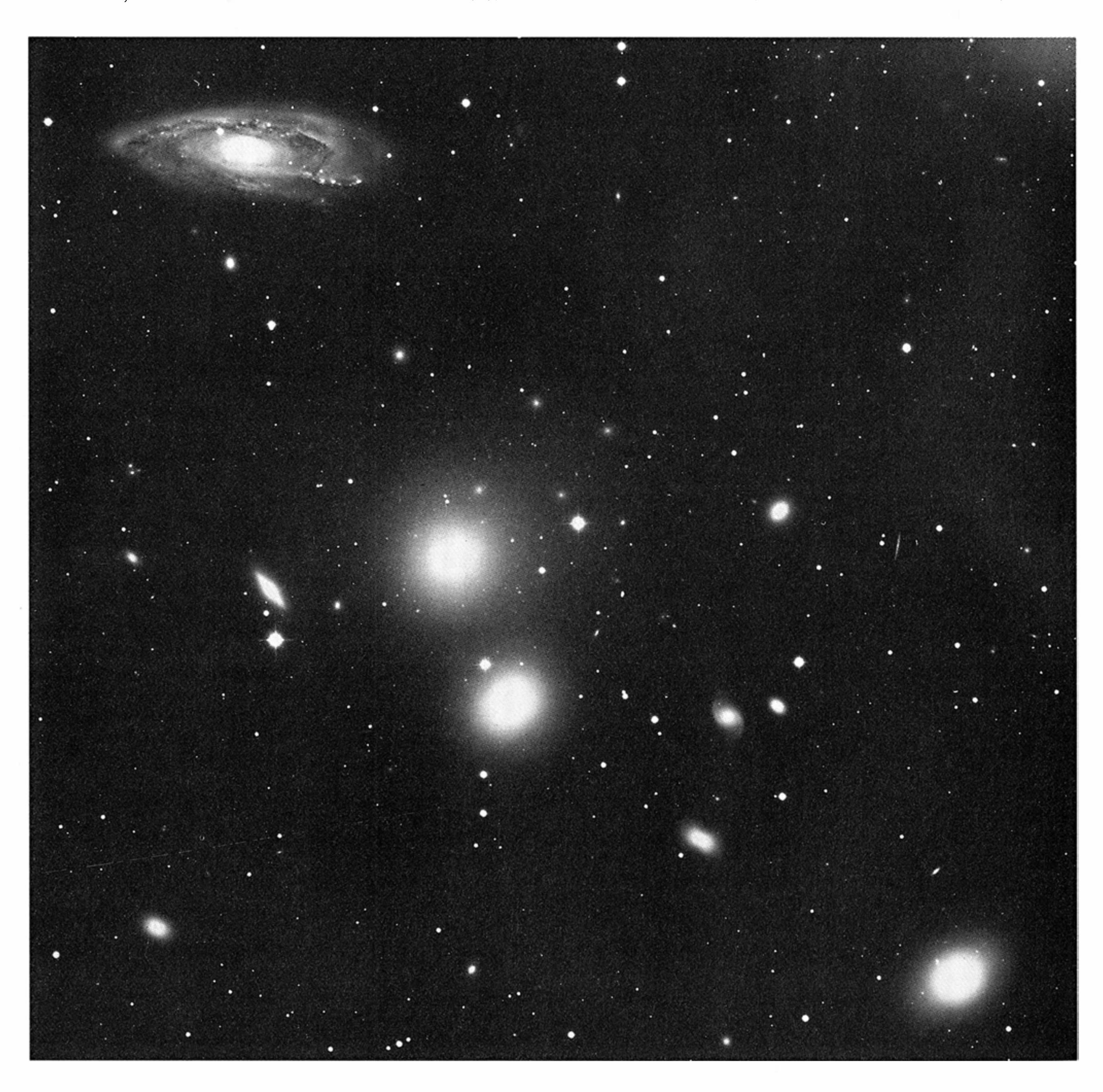
También existe el "problema de la planaridad". El modelo en cuestión indica que el universo se ha de curvar más a medida que pasa el tiempo, y sin embargo se comprueba que la geometría espacial de la parte del universo observable es extremadamente plana. El universo sólo podría presentar tal planaridad si en sus comienzos hubiera sido casi exactamente plano, con la enorme precisión de una parte en 10^{60}, lo cual es totalmente antinatural en opinión de muchos cosmólogos.

Quizá lo más significativo sea que el mencionado modelo no explica adecuadamente el origen de grandes estructuras, como las galaxias. Edward R. Harrison, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, y Yakov B. Zel'dovich, del Instituto de Problemas Físicos de Moscú, han dado explicaciones parciales, mostrando cómo tales estructuras pueden surgir a partir de pequeñas fluctuaciones de la densidad de materia en un universo primitivo, por lo demás homogéneo. Sin embargo, el origen fundamental de estas fluctuaciones seguía desconociéndose por completo, teniéndose que considerar las mismas como condiciones iniciales.

En resumen, pues, el modelo de la gran explosión caliente acusaba una extremada dependencia de las condiciones iniciales. Encontrar el universo actual en este modelo sería tan improbable como encontrar un lápiz en equilibrio sobre la punta después de un terremoto.

En 1980 Alan H. Guth, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, propuso una alternativa convincente a la excesiva precisión antes mencionada. Su modelo, denominado universo inflacionario, se asemeja al de la gran explosión caliente excepto en una característica esencial: el esquema de Guth mantiene que el universo empezó con un periodo de expansión extraordinariamente rápida, aunque de suma brevedad. Este proceso, llamado inflación, habría durado un instante increíblemente fugaz, unos 10^{-30} segundos, durante el cual el universo se habría expandido en un factor igualmente asombroso de 10^{30}, pasando de un tamaño inicial de 10^{-28} centímetros hasta aproximadamente un metro.

Esencialmente, la inflación de Guth es una cuña increíblemente breve in-



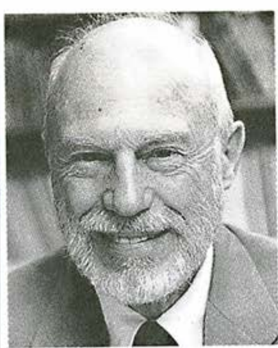
Artífices de la cosmología moderna

ERWIN SCHRÖDINGER (1887-1961), físico austríaco, fue uno de los padres de la mecánica cuántica. Basado en la idea de que la materia se puede comportar como partícula o como onda, estableció la ecuación fundamental que determina la función de onda de los sistemas atómicos. De mente inquieta, estudió más tarde la filosofía y la literatura de las culturas orientales e intentó demostrar cómo podía utilizarse la física cuántica para explicar la estructura genética.



GEORGE GAMOW (1904-1968) emigró de la URSS en 1934, y se distinguió por sus múltiples aportaciones en muchas áreas de la física, lanzando en 1948 la idea de la gran explosión como parte de una teoría sobre el origen de los elementos ligeros. Brillante, aunque algo excéntrico al decir de sus colegas, no siempre fue tomado en serio.





JOHN A. WHEELER (n. 1911), profesor emérito en la Universidad de Princeton, ha contribuido muy destacadamente a numerosas teorías de la física moderna, desde una descripción cuántica de la fisión nuclear hasta las estrellas de neutrones y los agujeros negros. Además, estudia las implicaciones filosóficas de la mecánica cuántica.
BRYCE S. DEWITT (n. 1923), de la Universidad de Texas en Austin, ha trabajado en la aplicación de la teoría cuántica al universo y sobre la gravedad cuántica. Juntos, Wheeler y DeWitt formularon en los años sesenta el equivalente cosmológico de la ecuación de Schrödinger.

sertada en el inicio del modelo de la gran explosión caliente, pero que permite resolver muchos problemas. En efecto, desaparece el problema del horizonte, puesto que el universo observado surge de una región suficientemente pequeña para permitir el contacto causal. Asimismo, el de planaridad, toda vez que la enorme expansión hincha de tal manera el universo que lo hace parecer plano, como parecería plana una zona cualquiera de la superficie de un enorme globo inflado. El problema de la fluctuación de densidad se resuelve también: el modelo predice que la repentina expansión habría desencadenado fluctuaciones cuánticas que podrían haber sido las semillas generadoras de las grandes estructuras antes mencionadas.

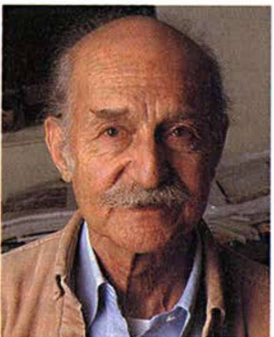
Pero, ¿por qué habría de ocurrir esta inflación momentánea? Guth descubrió una causa plausible en una clase peculiar de materia constitutiva del universo, que en su modelo ya no es un plasma o polvo uniformemente distribuido como en el modelo clásico de la gran explosión, sino que consiste en partículas de campo escalar. Tales partículas no son habituales en la vida diaria, pero surgen de manera natural en numerosas teorías; realmente, se considera que son la forma dominante de la materia en condiciones de energía extremadamente elevada, parecidas a las del universo primitivo. Según el modelo inflacionario, conducen a una especie de presión negativa por cuya acción la gravedad se convierte en fuerza repulsiva y se produce la inflación. Al final de la era inflacionaria, la desintegración de la materia del campo escalar que produjo la expansión calentó el universo (inicialmente frío) a una temperatura muy elevada. La evolución subsiguiente recorrió exactamente el camino descrito por el modelo de la gran explosión caliente: el universo se expansionó y luego se enfrió, siendo el calor residual detectable como la radiación cósmica de fondo.

Quizás el aspecto más importante del modelo de universo inflacionario sea que, como ya se ha indicado, ofrece una posible explicación al origen de las fluctuaciones de densidad que habrían generado las galaxias y las demás estructuras. En efecto, parte del supuesto de que, aunque el campo escalar sea muy homogéneo, podría todavía contener pequeñas partes no homogéneas. Según la teoría cuántica, estas partes no pueden ser exactamente cero, sino que deben estar sujetas a minúsculas fluctuaciones cuánticas. De hecho, estas fluctuaciones afectan a todos los tipos de materia, si bien para casi todas las aplicaciones son tan pequeñas que carecen de valor. La rápida expansión del universo durante la inflación magnificó estas fluctuaciones microscópicas en un comienzo insignificantes, transformándolas en cambios macroscópicos de la densidad, efecto que es incapaz de producir la expansión mucho más lenta del modelo de la gran explosión caliente. De hecho, los cálculos detallados demostraron que, adoptando ciertas hipótesis acerca del campo escalar, las fluctuaciones de densidad resultantes eran del tipo sugerido por Harrison y Zel'dovich.

La inflación mejora espectacularmente el modelo de la gran explosión caliente por cuanto permite que el estado del universo observado actualmente haya surgido de un conjunto de condiciones iniciales más amplio y plausible. Sin embargo, la inflación no libera totalmente a dicho estado observado de la dependencia de hipótesis formuladas sobre las condiciones iniciales. En particular, la propia inflación descansa sobre varias hipótesis: por ejemplo, que el campo escalar haya empezado con densidad de energía grande y aproximadamente constante, la cual sería equivalente, por lo menos durante un tiempo breve, a la afamada (o vituperada) constante cosmológica de Einstein. Por tanto, guste o no, el éxito de la inflación se apoya en ciertos supuestos sobre las condiciones iniciales.

¿Cuál es el origen de todas las hipótesis? Obviamente se puede prolongar la serie de preguntas hasta el infi-




RALPH A. ALPHER (n. 1921), protegido de Gamow actualmente en el Union College, y **ROBERT HERMAN** (n. 1914), de la Universidad de Texas en Austin, predijeron la existencia de la radiación de fondo cósmica en 1948 cuando trabajaban en la Universidad Johns Hopkins; con ello intentaban dar coherencia a las teorías del físico ruso sobre el origen del universo y la creación de los elementos ligeros.

HUGH EVERETT III (1930-1982), alumno de Wheeler en los años cincuenta en Princeton, resolvió el problema entre observador y observado con su interpretación de los "muchos mundos" que inicialmente desarrolló para su tesis de doctorado. Más tarde contribuyó a la teoría de juegos y a la investigación operativa.



STEPHEN W. HAWKING (n. 1942) ayudó a demostrar que las singularidades son una consecuencia inevitable de la relatividad general de Einstein. Quizá se le conoce más por haber demostrado que los agujeros negros no son en realidad negros sino que radian energía. Desempeñó un papel esencial en revitalizar la cosmología cuántica en los años ochenta, utilizándola para comprender lo que sucedió "antes" de la gran explosión. Ocupa la cátedra Isaac Newton.



nito, como haría un niño curioso. El cosmólogo que busca una explicación completa llega finalmente a preguntarse lo que sucedió antes de la inflación y cómo se inició realmente el universo. Para buscar las respuestas a estas preguntas podemos remontarnos en el tiempo hasta la era anterior a la inflación, en la cual el tamaño del universo tiende a cero y la intensidad del campo gravitatorio y la densidad energética de la materia tienden a infinito. Es decir, el universo parece haber surgido de una singularidad, de una región de curvatura y densidad energética infinitas en la que las leyes conocidas de la física dejan de tener validez.

Las singularidades no son elaboraciones de los modelos, sino consecuencia de los famosos "teoremas de las singularidades", enunciados en los años sesenta por Hawking y Roger Penrose, de la Universidad de Oxford. En ellos se demuestra que, adoptando hipótesis razonables, cualquier modelo del universo en expansión extrapolado hacia atrás en el tiempo encontrará una singularidad en su principio.

Los teoremas no implican, sin embargo, que físicamente tenga lugar una singularidad; antes bien, la teoría que las predice, la relatividad general clásica, deja de valer a curvaturas muy elevadas y debe ser sustituida por otra teoría más amplia, refinada y poderosa. Las consideraciones de escala sugieren que ha de recurrirse a una teoría aplicable a los pequeñísimos volúmenes que toma el espacio-tiempo, extremadamente curvado, cerca de una singularidad, y ésta sólo puede ser la teoría cuántica.

La teoría cuántica resultó de un intento de explicar los fenómenos que sobrepasaban a la física clásica convencional. Un defecto fundamental de la mecánica clásica fue su incapacidad de explicar la estructura del átomo. Los experimentos sugerían que el átomo consistía en electrones girando en torno de un núcleo, al igual que los planetas describen órbitas alrededor del sol. Sin embargo, los análisis de este modelo mediante la física clásica predecían que los electrones deberían caer sobre el núcleo; nada había que los mantuviera en órbita.

A fin de superar esta discrepancia entre observación y teoría, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner K. Heisenberg y Paul A. M. Dirac, entre otros, desarrollaron, a principios del siglo XX, la mecánica cuántica. En esta formulación, el movimiento no es determinista (como en la mecánica clásica), sino probabilista. Las variables dinámicas, como la posición y la cantidad de movimiento, no tienen en general valores definidos en la mecánica cuántica, que considera esencial la naturaleza ondulatoria de los sistemas. Una magnitud denominada función de onda contiene la información probabilista sobre variables tales como la posición, cantidad de movimiento y energía; se halla esta función para un determinado sistema resolviendo la ecuación llamada de Schrödinger.

Para una partícula puntual única, la función de onda se puede considerar un campo oscilante distribuido por el espacio físico, adoptando en cada punto del mismo una amplitud y una longitud de onda. El cuadrado de la amplitud es proporcional a la probabilidad de encontrar la partícula en dicha posición, mientras que en las funciones de onda con amplitudes constantes la longitud de onda está relacionada con la cantidad de movimiento de la partícula. Sin embargo, como las funciones de onda de posición y cantidad de movimiento son mutuamente excluyentes, siempre existirá una indefinición o incertidumbre entre ambas cantidades. Cuanto más precisa es la medición de una propiedad, por ejemplo la posición, más indefinido se vuelve, en correspondencia, el valor de la otra. Ese estado de cosas, denominado principio de indeterminación de Heisenberg, es una consecuencia elemental de la naturaleza ondulatoria de las partículas.

El principio de indeterminación conduce a fenómenos cualitativamente dis-

tintos de los que ocurren en mecánica clásica. En mecánica cuántica un sistema nunca puede tener una energía exactamente igual a cero. En general, la energía total es la suma de las energías cinética y potencial; la primera de ellas depende de la cantidad de movimiento, y la segunda depende de la posición (una pelota en lo alto de una montaña tiene más energía potencial gravitatoria que otra situada en un valle). Dado que el principio de indeterminación prohíbe valores simultáneos definidos de cantidad de movimiento y posición, las energías cinética y potencial no pueden ser exactamente nulas a la vez; en lugar de ello, el sistema tiene un estado fundamental en el que la energía es lo más baja posible. Recuérdese, a estos efectos, que en el modelo de universo inflacionario las galaxias se forman a partir de fluctuaciones de un estado fundamental. Tales fluctuaciones evitan además que los electrones se estrellen contra el núcleo, pues existe una órbita de energía mínima desde la que los electrones no pueden caer sobre el núcleo sin violar el principio de indeterminación.

El fenómeno denominado efecto túnel o tunelización obedece también a la indeterminación. En la mecánica clásica, una partícula animada de un valor fijo de energía no puede penetrar a través de una barrera energética, igual que una bola en reposo dentro de un tazón nunca podrá salir del mismo. En mecánica cuántica, la posición no está definida con precisión, sino que se distribuye en un intervalo (normalmente infinito). En consecuencia, hay probabilidad de que la partícula se encuentre en el otro lado de la barrera, y entonces se dice que puede atravesar por un "túnel" dicha barrera.

No debe pensarse que el efecto túnel ocurre en el tiempo real. En cierto sentido, matemáticamente bien definido, es adecuado imaginar que la partícula atraviesa la barrera en un tiempo "imaginario", es decir, tiempo multiplicado por la raíz cuadrada de menos uno, que pierde aquí su significado temporal usual para asemejarse más a una dimensión espacial.

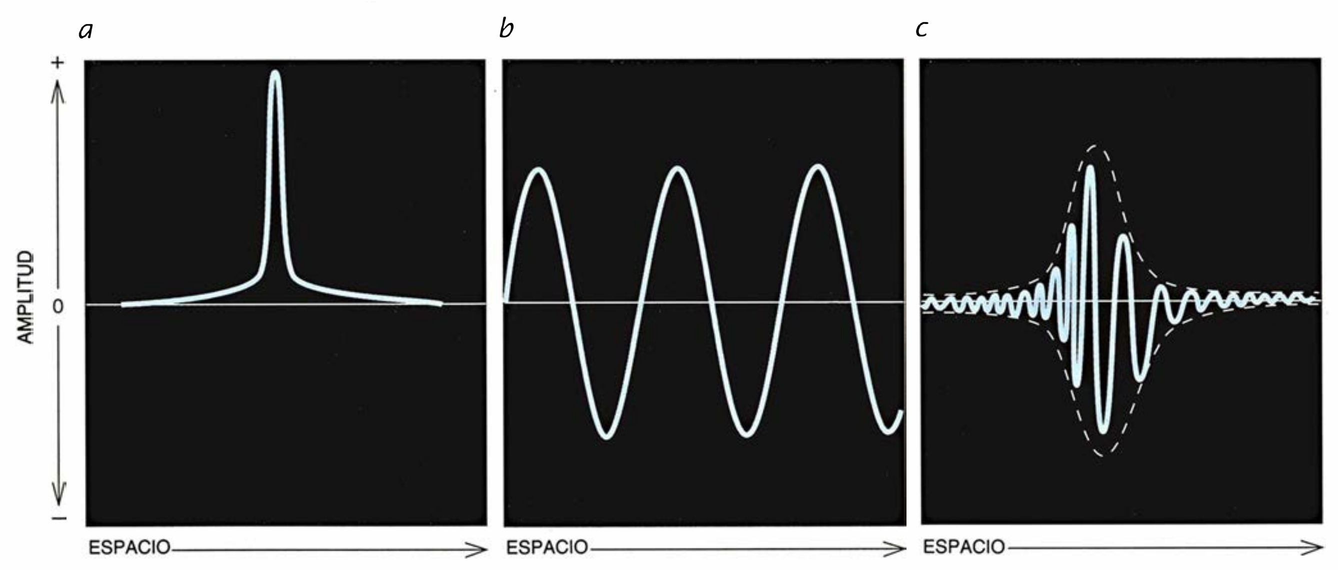
Estos efectos marcadamente cuánticos no contradicen la mecánica clásica. Por el contrario, la mecánica cuántica es una teoría más amplia, y reemplaza a la mecánica clásica como descripción correcta de la naturaleza. A escalas macroscópicas la naturaleza ondulatoria de las partículas desaparece, por lo que la mecánica cuántica reproduce los efectos de la mecánica clásica con un alto grado de precisión, aunque todavía sea objeto de investigación la manera de producirse esta transición de "cuántica a clásica".

¿De qué modo pueden estas intuiciones arrojar luz sobre las cuestiones cosmológicas? Igual que la mecánica, la cosmología cuántica intenta describir un sistema fundamentalmente por su función de onda. Se puede encontrar la función de onda del universo resolviendo la ecuación denominada de Wheeler-DeWitt, que corresponde a la ecuación de Schrödinger en cosmología. En los casos más sencillos, el tamaño espacial del universo es el análogo de la posición, y la velocidad de expansión del universo representa la cantidad de movimiento.

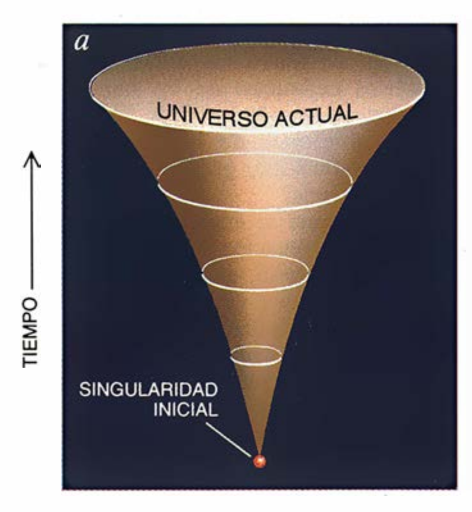
Sin embargo, en cosmología cuántica surgen numerosas dificultades conceptuales y técnicas que superan y rebasan las que se presentan en mecánica cuántica, siendo la más seria la falta de una teoría cuántica de la gravedad completa y manejable. Tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, el electromagnetismo, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil, se han podido compaginar con la teoría cuántica, pero todos los intentos de cuantizar la relatividad general de Einstein han fracasado. Este fallo es preocupante: recuérdese que la relatividad general, la mejor teoría de la gravedad a nuestro alcance, establece que en la singularidad el espacio se hace infinitamente pequeño y la densidad de energía infinitamente grande. Mirar más allá de ese instante exige una teoría cuántica de la gravedad.

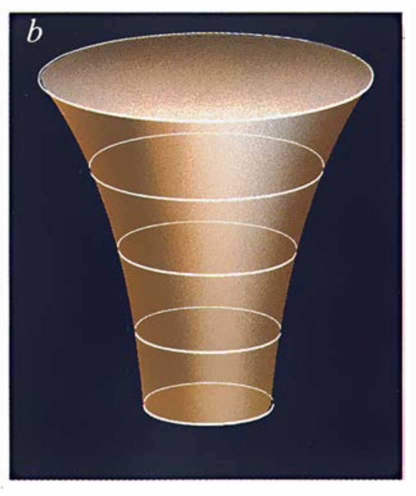
Debo advertir que los proponentes de una teoría de "supercuerdas" pretenden que ésta sea una teoría cuántica unificada y coherente de las cuatro fuerzas de la naturaleza y, por tanto, es, o por lo menos contiene, una descripción cuántica de la gravedad. De todos modos, aunque todavía no se haya emitido un juicio definitivo sobre ella, esta teoría dista mucho de ser manejable y directamente útil para la cosmología.

Otra cuestión planteada a los investigadores es la aplicación de la mecánica cuántica a todo el universo. La mecánica cuántica se desarrolló para describir los fenómenos a escala atómica. El feliz acuerdo logrado entre la mecánica cuántica y la experiencia es uno de los grandes triunfos de la física moderna; ningún físico o física en



2. EL PRINCIPIO DE INDETERMINACION impide el establecimiento exacto de la posición y la cantidad de movimiento de una partícula. La función de onda de una partícula en un estado de posición definida presentará un pico agudo en un punto del espacio, pero la indeterminación de la cantidad de movimiento es muy grande (*a*). Para un estado de cantidad de movimiento definido, la función tiene cierta longitud de onda y una amplitud constante en todo el espacio, pero la posición de la partícula es incierta (*b*). El estado "coherente" representa un compromiso (*c*), con indefinición tanto en posición como en cantidad de movimiento, pero lo más pequeña que el principio de indeterminación permite.







3. "TUBOS" DEL ESPACIO-TIEMPO, que representan la evolución del universo. En las teorías clásicas, cualquier modelo razonable del universo encuentra una singularidad al hacer retroceder su evolución en el tiempo (*a*). En la cosmología cuántica el estado inicial del universo puede no ser necesariamente un punto (*b*). Algunas propuestas indican que el universo comenzó desde una especie de casquete perfectamente suave (*ilustración de la derecha*). Esta "suavización" tiene lugar en tiempo imaginario, de manera que no contradice los teoremas de singularidades, referidos al tiempo real. Poco después de la creación cuántica, el universo evolucionó de modo clásico en el tiempo físico real.

su recto juicio alberga duda alguna acerca de su corrección a escala atómica. No obstante, pueden alzarse voces disidentes si alguien pretende que la mecánica cuántica sea igualmente aplicable a mesas y sillas, por ejemplo. El reto no es fácil de esquivar, ya que a escala macroscópica las predicciones de la mecánica cuántica coinciden estrechamente con las de la mecánica clásica. Los efectos cuánticos macroscópicos genuinos son extremadamente difíciles de detectar de modo experimental. Todavía es más controvertida la extrapolación más extravagante posible: que la mecánica cuántica se aplique en todos los tiempos al universo entero y a todo lo que éste contenga, afirmación que, aceptable o no, es el fundamento de la cosmología cuántica.

Otro problema, quizá más difícil, atañe a la interpretación de la mecánica cuántica aplicada a la cosmología. En el desarrollo de dicha mecánica, tal como se aplica a los átomos, resultó necesario comprender cómo se relacionan las matemáticas de la teoría con lo que realmente se observa durante una medición. Bohr sentó las bases de esta relación, que se denomina teoría de la medición cuántica, en los años 20 y 30. Supuso que el mundo es divisible en dos partes: los sistemas microscópicos (tales como los átomos), regidos puramente por la mecánica cuántica, y los sistemas macroscópicos externos (como los observadores y sus aparatos de medición), gobernados por la mecánica clásica. La medición es una interacción entre el observador y el sistema microscópico que conduce a un registro permanente del suceso.

Durante la citada interacción, la función de onda que describe el sistema microscópico sufre un cambio discontinuo desde su estado inicial hasta cierto estado final, en el cual toma un valor concreto la cantidad que se mide. Al referido cambio discontinuo se le llama, con cierto dramatismo, colapso de la función de onda. Por ejemplo, la función de onda podría empezar en un estado de cantidad de movimiento definido, pero si se mide la posición, se "colapsa" a un estado de posición definida.

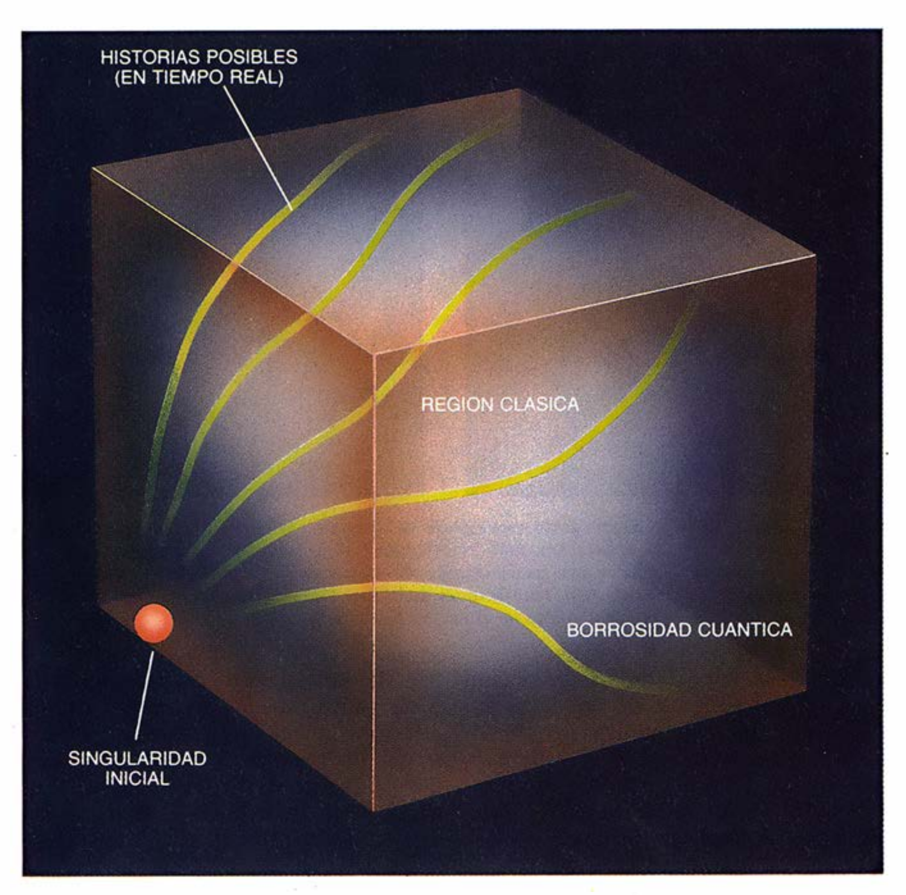
Aunque para muchos teóricos este esquema, llamado interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, sea filosóficamente insatisfactorio, permite extraer predicciones de la teoría, predicciones que concuerdan con la observación. Quizá por esta razón la interpretación de Copenhague no ha sido impugnada durante casi medio siglo.

Pese a todo, al intentar aplicar la mecánica cuántica al universo entero, se encuentran severas dificultades que no pueden descartarse como sutilezas filosóficas. En efecto, en una teoría del universo, del cual forma parte el observador, no debe haber una división fundamental entre observador y observado. Además, la mayoría de los investigadores se sienten incómodos al pensar en que la función de onda del universo total se colapsa cuando se hace una observación. También aparecen problemas relacionados con las predicciones probabilísticas, que corrientemente se comprueban efectuando un gran número de mediciones: por ejemplo, lanzando muchas veces una moneda al aire se comprueba que la probabilidad de que salga cara es un medio. Sin embargo, en cosmología hay un sistema único que sólo se mide una vez.

Siendo consciente de estas dificultades, Hugh Everett III, de Princeton, uno de los primeros físicos en considerar seriamente la idea de aplicar la mecánica cuántica al universo, presentó un marco para interpretar la mecánica cuántica, muy adecuado a las necesidades específicas de la cosmología. Contrariamente a Bohr, Everett afirmaba que existe una función de onda universal, la cual describe tanto los observadores macroscópicos como los sistemas microscópicos, sin ninguna división fundamental entre ellos. La medición es simplemente una interacción entre distintas partes de todo el universo, y la función de onda debe predecir lo que "ve" una parte del sistema cuando observa otra parte.

Por tanto, en la representación de Everett no hay colapso de la función de onda, sino mera evolución gradual, descrita por la ecuación de Schrödinger para el sistema entero. Pero además, al modelar el proceso de medición, Everett hizo un descubrimiento notable: la medición provoca que el universo se "desdoble" en un número de copias de sí mismo suficiente para tener en cuenta todos los resultados posibles de tal medición.

Los teóricos han debatido con ardor la realidad de tal multiplicación de copias en la antieconómica interpretación de los "mundos múltiples" de Everett. De hecho, las versiones modernas de la idea de Everett, generadas sobre todo por Murray Gell-Mann, del Instituto de Tecnología de California, y por Hartle, quitan importancia a este aspecto de multiplicidad de mundos en la teoría. En lugar de ello, sus versiones tratan de "historias inconexas", que son historias posibles del universo a las que se pueden asignar probabilidades. En la práctica no importa creer que sólo una, o todas ellas,



4. LAS POSIBLES HISTORIAS del universo, indicadas por las líneas verdes, surgen de una "borrosidad cuántica", como indican las funciones de no-contorno y tunelización. La borrosidad rodea la singularidad inicial (definida clásicamente), pero un observador que retroceda en el tiempo vería que las historias emergen de una zona finita de manera no singular.

acontecen. Estas ideas presentan, asimismo, el gran mérito de eliminar el papel del observador y la necesidad de colapsar la función de onda, así como de proporcionar a los teóricos, pese a la controversia suscitada, una especie de marco referencial para sus trabajos.

Gell-Mann y Hartle atacan también la cuestión de las probabilidades del universo. Insisten en que las únicas probabilidades que poseen algún sentido en la cosmología cuántica son las establecidas a priori; éstas han de ser próximas a uno o a cero, es decir, predicciones definidas sí-no. Aunque la mayoría de predicciones probabilísticas no pertenecen a este tipo, a menudo pueden convertirse en él modificando convenientemente las preguntas que se fomulan. Al revés de la mecánica cuántica, en la que el objetivo es determinar las probabilidades de los posibles resultados de ciertas observaciones, la cosmología cuántica intenta determinar las observaciones para las cuales la teoría da probabilidades próximas a cero o a uno.

A través de esta clase de planteamiento se ha llegado a comprender que en ciertos puntos del espacio y el tiempo, normalmente (aunque no siempre) cuando el universo es grande, la función de onda del universo indica que éste se comporta con un elevado grado de precisión. El espacio-tiempo clásico obedece entonces a las predicciones de la teoría. En estas circunstancias, además, la función de onda proporciona las probabilidades correspondientes al conjunto de posibles comportamientos clásicos del universo.

Por otro lado, existen ciertas regiones (verbigracia, las próximas a las singularidades clásicas) en las que tal predicción no es posible por no tener allí sentido las nociones de espacio y tiempo, sino solamente un "difuminado cuántico" ("quantum fuzz"), todavía descriptible mediante leyes conocidas de la física cuántica, pero no por la física clásica. Por tanto, en cosmología cuántica, ya es inútil esforzarse por intentar imponer condiciones iniciales clásicas en una región donde la física clásica no es válida, como sucede cerca de la singularidad inicial.

Sin embargo, la función de onda del universo descrita por la teoría cuántica de la cosmología no elimina la necesidad de suponer condiciones iniciales. Sucede, en cambio, que las condiciones iniciales clásicas, los modelos de la inflación y de la gran explosión, se convierten en condiciones iniciales cuánticas: de las numerosas funciones de onda posibles (las múltiples soluciones de la ecuación de Wheeler-DeWitt), ¿cómo seleccionar solamente una?

El problema se entiende mejor comparando la situación cosmológica con la del laboratorio, entorno de casi todos los trabajos científicos. Allí, un sistema tiene definidos los límites espaciales y temporales, por ejemplo, la duración de la reacción, o el tamaño del vaso de precipitados. En estos límites los investigadores controlan, o al menos observan, los estados físicos; mediante leyes físicas adecuadas tal vez sean capaces de determinar cómo evolucionan en el espacio y el tiempo las condiciones iniciales o de contorno.

En cosmología, el sistema que se analiza es el universo entero. Por definición, no tiene un exterior, no existe para él mundo externo; carece de un "resto del universo" al que se pueda recurrir para las condiciones iniciales o de contorno. Además, parece muy improbable que la coherencia matemática conduzca por sí sola a una solución única de la ecuación de Wheeler-DeWitt, tal como DeWitt sugirió una vez. Por consiguiente, de modo muy semejante a como los físicos teóricos proponen leyes que gobiernan la evolución de los sistemas físicos, la tarea ineludible de los cosmólogos cuánticos es proponer leyes de condiciones iniciales o de contorno para el universo. En particular, Hartle y Hawking, Linde y Vilenkin han elaborado propuestas bastante definidas encaminadas a seleccionar una solución de la ecuación de Wheeler-DeWitt, es decir, escoger una función de onda del universo.

La propuesta de Hartle y Hawking define una determinada función de onda del universo utilizando una formulación bastante elegante de la mecánica cuántica que fue desarrollada en los años cuarenta por Richard P. Feynman, del Caltech. Esta formulación se denomina método de las integrales de camino o de suma sobre las historias. En la mecánica cuántica ordinaria, el cálculo de la función de onda implica realizar una cierta suma sobre una clase de historias del sistema, las cuales acaban en el punto del espacio y el tiempo en el que se desea saber el valor de la función de onda. Para que esta función sea única, se especifica con precisión la clase de historias sobre las que se debe sumar, clase que incluye no sólo las historias clásicas sino también todas las historias posibles del sistema.

La suma sobre las historias equivale matemáticamente a resolver la ecua-

ción de Schrödinger, si bien ofrece una perspectiva muy distinta de la mecánica cuántica que ha resultado muy valiosa y fecunda. En particular, el método de suma sobre las historias se generaliza fácilmente a la cosmología cuántica. La función de onda del universo puede calcularse sumando sobre algunas clases de historias del universo, técnica que equivale a resolver la ecuación de Wheeler-DeWitt, como se demuestra con toda generalidad en un trabajo reciente de Hartle y el autor. La solución determinada que se obtiene depende de la manera de elegir la clase de historias sobre la cual se suma.

Un modo de entender la elección realizada por Hartle y Hawking es traducir sus matemáticas a geometría. Imagínese la dimensión espacial del universo en un instante de tiempo determinado como un bucle cerrado de cuerda situado en un plano horizontal. Representando el tiempo en el eje vertical, el bucle cambia de tamaño a medida que pasa el tiempo, lo que ejemplifica la expansión y contracción del universo. Por tanto, las diversas historias posibles del universo aparecen como tubos que va barriendo el bucle al evolucionar en el tiempo. El borde final representa el universo actual; el extremo opuesto es el estado inicial —es decir, la creación del universo—, que se ha de especificar mediante las condiciones de contorno propuestas. Algunos tubos podrían terminarse en una extremidad afilada, como el vértice de un cono; otros, sencillamente, acabar de improviso.

Hartle y Hawking propusieron que sólo se consideren los tubos cuyo extremo inicial se reduce a cero de manera progresiva y regular, formando una especie de casquete semiesférico. Entonces la suma se realiza sobre geometrías que no tienen contorno, excepto en el extremo final que es abierto y corresponde al universo actual. Por esta razón la idea de Hartle y Hawking se denomina propuesta de no-contorno.

El cerrar la geometría de un modo tan gradual es imposible en la teoría clásica. Los teoremas de singularidad implican que las historias clásicas del universo deben contraerse hasta cero de una manera singular, muy parecida a la reducción a un punto del final de un cono. Sin embargo, en la teoría cuántica el método de suma sobre las historias admite muchas historias posibles, no solamente las clásicas, y el cierre gradual se convierte en posible. En particular, puede considerarse que esta región ocurre en el tiempo imaginario y, como tal, es claramente no clásica.

Este razonamiento ha suscitado otra propuesta, o solución, a la ecuación de Wheeler-DeWitt. Recuérdese que la aparición del tiempo imaginario es característica de los procesos de efecto túnel en la teoría cuántica. Tal vez, entonces, el universo haya surgido de la "nada" por efecto túnel, tras lo cual habría venido toda la evolución descrita por la inflación y la gran explosión. No obstante, la función de onda de no-contorno carece de las características generales que normalmente se asocian con la tunelización, puesto que da una alta probabilidad a un universo clásico que apareciera con gran tamaño y pequeña densidad energética. En cambio, un proceso ordinario de efecto túnel suprimiría una transición desde cero a un tamaño grande y daría la máxima probabilidad a la tunelización hacia un tamaño pequeño que tuviera una elevada densidad de energía.

En parte por esta razón, Linde y Vilenkin presentaron por separado una propuesta basada en el efecto túnel. Su formulación precisa es matemática, pero basta con decir que define un método para seleccionar una solución de la ecuación de Wheeler-DeWitt que posea las propiedades esperadas de un proceso de efecto túnel. Esta solución permite considerar con mayor fundamento que el universo haya surgido de la nada por un proceso del tipo señalado.

Las propuestas de no-contorno y de efecto túnel seleccionan una función de onda única del universo —dependiendo, sin embargo, de la resolución de algunas dificultades técnicas recientemente expuestas por Hartle, Jorma Louko, de la Universidad de Alberta, y el autor de este artículo. En ambas propuestas, la función de onda indica que el espacio-tiempo se comporta conforme a la cosmología clásica cuando el universo es unos miles de veces mayor que el tamaño para el cual las cuatro fuerzas de la naturaleza estarían unificadas (unos 10^{-33} centímetros), en acuerdo con la observación. Sin embargo, cuando el universo es aún más pequeño, la función de onda indica que el espacio-tiempo clásico no existe.

Dada una sola función de onda del universo, cabría, pues, preguntarse: "¿cómo empezó el universo?" En vez de responder, un cosmólogo cuántico reformularía la pregunta. En la proximidad de singularidades, las funciones de onda dadas por las propuestas de efecto túnel y de no-contorno establecen que la relatividad general clásica ya no es válida. Además, las nociones de espacio y tiempo implícitas en la pregunta se pierden totalmente. La imagen que aparece entonces es la de un universo de tamaño no nulo y densidad de energía finita (en vez de infinita), que proviene de una borrosidad cuántica.

Después de la creación cuántica, la función de onda asigna probabilidades a distintas trayectorias evolutivas, una de las cuales incluye la inflación postulada por Guth. Aunque algunos teóricos no están de acuerdo, tanto la propuesta de no-contorno como la de tunelización parecen predecir las condiciones requeridas para la inflación, haciendo por tanto innecesarias las hipótesis acerca de una materia de campo escalar que provocara la rápida expansión.

Las propuestas aquí referidas suprimen también las hipótesis relativas a perturbaciones de densidad, pues si bien la inflación explica el origen de las mismas, su forma y magnitud exactas dependen de ciertos supuestos acerca del estado inicial de la materia de campo escalar. El modelo inflacionario supone que las partes inhomogéneas se originaron en su estado fundamental mecánico-cuántico, es decir, el estado de mínima energía que pueda existir, compatible con el principio de indeterminación.

Sin embargo, en 1985 Hawking y yo demostramos que el anterior supuesto debe ser una consecuencia de la propuesta de no-contorno: las clases de inhomogeneidades correctas surgen naturalmente de la teoría. Dicha propuesta establece que todo debe ser progresivo y regular en el fondo redondeado del tubo espacio-temporal, condición que implica la anulación de las fluctuaciones inhomogéneas en esa región. Haciendo evolucionar el tubo hacia adelante en el tiempo imaginario, las fluctuaciones se crean y entran en la región de tiempo real con la magnitud mínima requerida por la mecánica cuántica para las fluctuaciones del estado fundamental del modelo inflacionario. La propuesta del efecto túnel hace la misma predicción por razones parecidas.

Llegamos así a una posible respuesta. Según la imagen que proporciona la cosmología cuántica, el universo apareció a partir de una borrosidad cuántica, pasando a la existencia por efecto túnel y evolucionando desde entonces de manera clásica. El aspecto más atractivo de esta imagen es que las hipótesis que sustentan el modelo del universo inflacionario pueden reducirse a una sola condición de contorno sencilla y relativa a la función de onda del universo.

¿Cómo se puede comprobar una ley de condiciones iniciales? Una prueba indirecta consiste en comparar las predicciones de los modelos cuánticos

con las condiciones iniciales que requieren los modelos cosmológicos clásicos corrientes, empresa en la que los cosmólogos cuánticos, tal como hemos visto, pueden atribuirse un grado razonable de éxito.

Las pruebas más directas, por observación, son difíciles. Mucho ha sucedido en el universo desde su nacimiento y cada etapa evolutiva debe modelarse separadamente. Es difícil distinguir entre los efectos que resultan de un determinado conjunto de condiciones iniciales y los que se deducen de la evolución del universo o del modelado de una etapa determinada.

Lo que se necesita es poder observar algún efecto que se hubiera producido en el comienzo del universo pero fuera insensible a su posterior evolución. En 1987 Leonid Grishchuk, del Instituto de Astronomía Sternberg de Moscú, argumentó que las ondas gravitatorias podrían constituir el efecto buscado. Ciertamente, los procesos de creación cuánticos producen ondas gravitatorias de forma e intensidad calculables, y estas ondas interaccionan muy débilmente con la materia a medida que se propagan en el espacio-tiempo. Por tanto, cuando las observamos en el universo actual, su espectro puede todavía contener la marca de la creación cuántica. Por desgracia, la detección de ondas gravitatorias es en extremo difícil, y han fracasado las actuales tentativas al respecto. Los nuevos detectores que se construirán más avanzada esta década pueden alcanzar la precisión suficiente para encontrarlas.

Dada la gran dificultad de comprobación de la cosmología cuántica, no podemos determinar de manera concluyente si las propuestas de no-contorno o de tunelización son las correctas para la función de onda del universo. Tal vez transcurra un largo tiempo antes de que podamos afirmar si alguna de las dos da respuesta a la pregunta "¿de dónde salió todo esto?". Pese a todo, a través de la cosmología cuántica hemos podido al menos formular y encarar tal pregunta con pleno sentido y de la manera más interesante.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUANTUM THEORY OF GRAVITY, PART 1: THE CANONICAL THEORY. Bryce S. DeWitt en *Physical Review*, vol. 160, n.º 5, págs. 1113-1148; 25 de agosto de 1967.

WAVE FUNCTION OF THE UNIVERSE. J. B. Hartle y S. W. Hawking en *Physical Review D*, vol. 28, n.º 12, págs. 2960-2975; 15 de diciembre de 1983.

QUANTUM COSMOLOGY. J. J. Halliwell. Cambridge University Press (en prensa).

La célula madre

Crea los componentes fundamentales de los sistemas hematopoyético e inmune. El aislamiento y manipulación de la célula madre permitirá abordar nuevos tratamientos para el cáncer y las inmunodeficiencias

David W. Golde

La sangre humana consta de un rico muestrario en el que cada célula está diseñada con minuciosa precisión para cumplir su propia función vital. Los eritrocitos, o glóbulos rojos, transportan oxígeno a través del cuerpo; las plaquetas, diminutas, impiden la hemorragia promoviendo la coagulación; los leucocitos —que abarcan linfocitos, monocitos y neutrófilos— forman el sistema inmune, que defiende al sujeto contra ataques de tejidos extraños, virus y otros microorganismos.

Por asombroso que parezca, tamaña diversidad celular arranca de una misma clase de célula patrón, la célula madre hematopoyética (formadora de sangre), que reside originalmente en la médula ósea. Las agresiones infligidas contra ella —piénsese en la quimioterapia, radiación o procesos morbosos— pueden desmantelar el sistema hematopoyético e inmune. Pero podemos trasplantar médula ósea para curar los pacientes cuyas células madre han sufrido tales daños. Nuestro conocimiento de la célula madre ha mejorado mucho en los últimos años y, con él, las posibilidades de refinar los métodos de trasplante de médula y preparar terapias más eficaces contra enfermedades que traen la ruina absoluta del cuerpo: cáncer, SIDA, anemia aplásica y trastornos en la autoinmunidad, entre otras.

¿Cuáles son la naturaleza y la función de las células madre? Llamaremos célula madre a la que puede autorreplicarse repetidamente y diferenciarse en varias clases de células secundarias. A medida que las células se van diferenciando, se van comprometiendo de forma cada vez más estrecha con un linaje particular, hasta que constituyen un solo tipo de célula: verbigracia, una célula precursora volcada a constituirse en eritrocito. Cualquier célula de la que arrancan variedades celulares más específicas cabe en esa definición de célula madre; ahora bien, para los propósitos de este artículo, restringiremos su significado a la célula madre hematopoyética.

Las células madre hematopoyéticas hacen su primera aparición en el saco vitelino del embrión humano. Emigran luego hasta el hígado a lo largo del proceso formador del feto. Las células sanguíneas se originan en el hígado de éste, mas, al poco del nacimiento, la sangre se produce ya sólo en la médula ósea. Las células madre del feto difieren de las células madre del adulto en que aquéllas originan tipos especiales de linfocitos, amén de glóbulos rojos, productores de la hemoglobina fetal. Diríase que las células madre fetales poseen un reloj interno que les señala en qué momento de la maduración del infante deben adquirir las propiedades distintivas de las células madre adultas.

Distínguense varios grados de "maternidad", que afectan a la gama de células especializadas originadas. Así, unas células madre pueden replicarse copiosamente y, en contrapartida, poseer una capacidad limitada para la diferenciación. El principal miembro de esa familia es la célula madre totipotente; en principio, basta una sola célula madre totipotente para reconstituir el sistema hematopoyético y el sistema inmune. Las células madre menos generales, aunque persisten en su capacidad de diferenciarse en varias líneas, se denominan pluripotentes.

Las células madre constituyen el ingrediente principal de los trasplantes de médula ósea. Las células de la médula ósea pueden mantenerse con vida en una cámara criogénica, para infundirlas luego en un paciente. Las células madre que porta la médula trasplantada están capacitadas para restablecer los sistemas inmune y hematopoyético del receptor. La médula trasplantada puede proceder del propio paciente (autotrasplante), o provenir de un donante (trasplante alogénico).

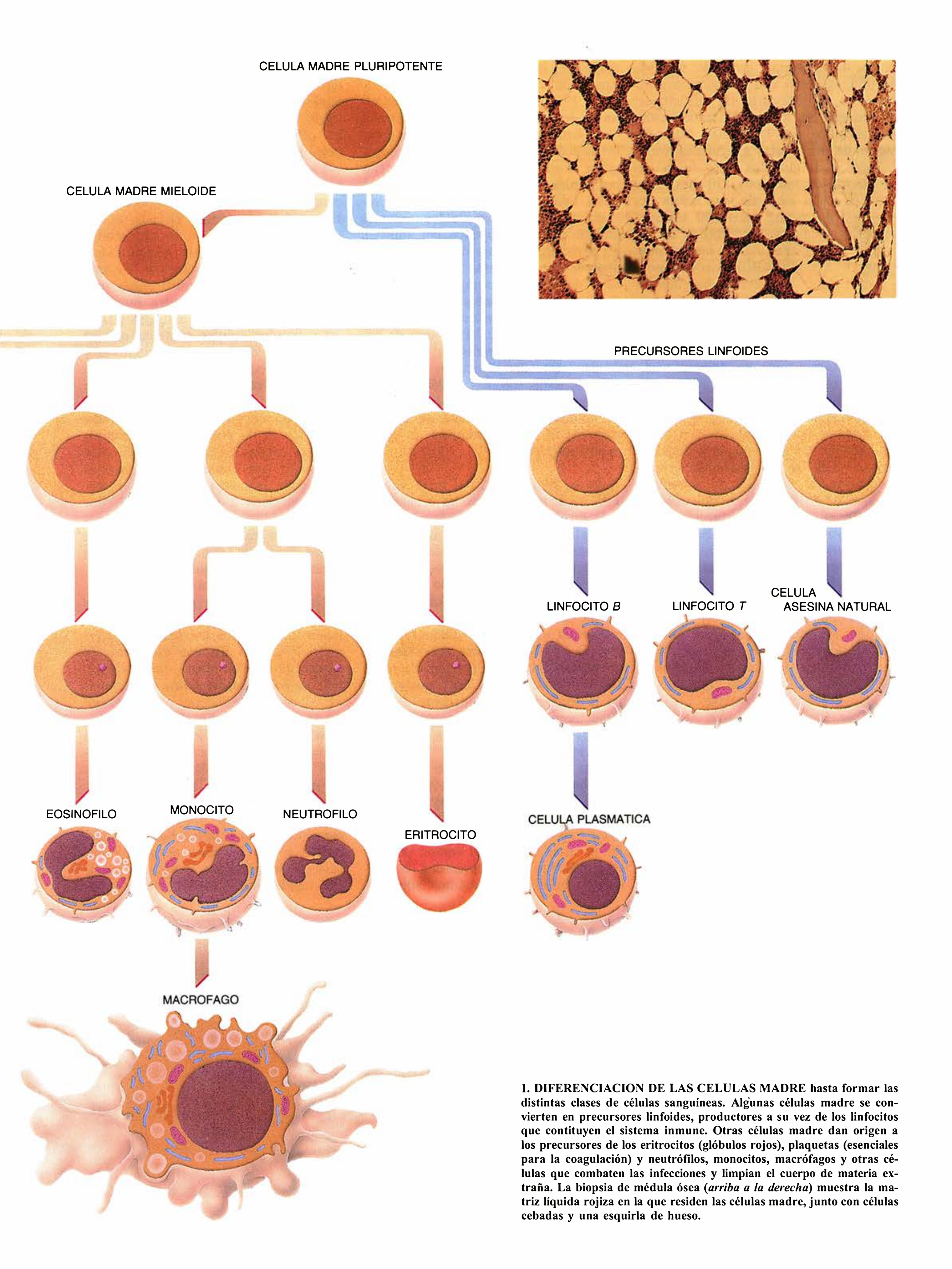
Las células precursoras que derivan de las células madre se replican y diferencian (o determinan) a un ritmo asombroso: cada hora, una persona normal produce de 3000 a 10.000 mi-

MEGACARIOCITO

PLAQUETAS

BASOFILO

DAVID W. GOLDE pertenece a las primeras levas de investigadores del desarrollo celular sanguíneo, normal y patológico. Se ha ocupado asimismo de los factores reguladores del crecimiento celular. Se doctoró en 1966 por la Universidad McGill, completando su formación clínica en la Universidad de California en San Francisco y en el Instituto Nacional de la Salud. Dirige la división de oncología hematológica del neoyorquino Memorial Sloan-Kettering.



1. DIFERENCIACION DE LAS CELULAS MADRE hasta formar las distintas clases de células sanguíneas. Algunas células madre se convierten en precursores linfoides, productores a su vez de los linfocitos que contituyen el sistema inmune. Otras células madre dan origen a los precursores de los eritrocitos (glóbulos rojos), plaquetas (esenciales para la coagulación) y neutrófilos, monocitos, macrófagos y otras células que combaten las infecciones y limpian el cuerpo de materia extraña. La biopsia de médula ósea (*arriba a la derecha*) muestra la matriz líquida rojiza en la que residen las células madre, junto con células cebadas y una esquirla de hueso.

llones de plaquetas, glóbulos rojos y neutrófilos, junto con un número desconocido de linfocitos. En situaciones de emergencia la tasa de producción se multiplica por 10 o más. La vida media de las células sanguíneas varía bastante. Los glóbulos rojos están en circulación durante unos 120 días, a lo largo de cuyo intervalo una célula de ésas podría recorrer unos 500 kilómetros. Las plaquetas permanecen en el torrente sanguíneo más o menos una semana; los neutrófilos, sólo unas 8 horas antes de pasar a los tejidos donde mueren. En el extremo opuesto se hallan algunos linfocitos, que sobreviven largos años, si no toda la vida del individuo.

Además de formar las diferentes células del torrente sanguíneo, las células madre originan también los macrófagos, componente importante del sistema inmune. Los macrófagos son células grandes de morfología y función similares a las de los monocitos, si bien se apartan de éstos por su presencia en la mayoría de órganos del cuerpo, salvo en el torrente circulatorio. Demostré ya en 1976, con E. Donnall Thomas, de la Universidad de Washington, que los macrófagos del pulmón derivaban de células madre. Examinamos macrófagos de pacientes que habían recibido un trasplante reciente de médula ósea de donantes del sexo opuesto, lo que facilitaba la identificación de las células trasplantadas. No se había cumplido el tercer mes desde el trasplante y todos los macrófagos pulmonares examinados eran ya del sexo del donante.

Dos años después, demostré con Robert P. Gale, de la Universidad de California en Los Angeles, que los macrófagos hepáticos procedían también de células madre de médula ósea. Otros han generalizado la idea al comprobar que los macrófagos de piel y cerebro, así como los osteoclastos (una clase de macrófago que resorbe y remodela el hueso), poseen idéntico origen medular.

En 1961 J. E. Till y E. A. McCulloch, de la Universidad de Toronto, confirieron un notable impulso a nuestro conocimiento del lugar donde operan y el modo de hacerlo de las células madre. Expusieron ratones a una dosis letal de radiación (con la destrucción consiguiente de los sistemas inmune y hematopoyético del animal); les inyectaron médula ósea sana de un donante genéticamente compatible. Al cabo de 12 días, extrajeron los bazos de los ratones irradiados y contaron las colonias de células hematopoyéticas que crecían allí. El número de colonias en el bazo reflejaba el número de células madre inyectadas en un comienzo. Estas colonias esplénicas derivaban, obviamente, de una población de células madre, aunque no necesariamente de la más primitiva, la célula madre totipotente.

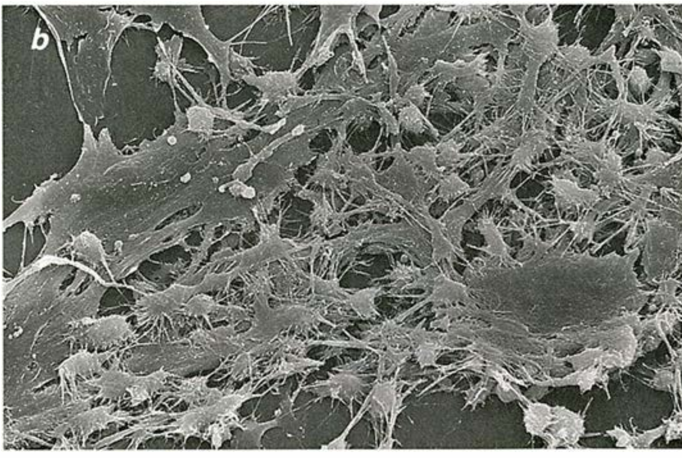
No es fácil aislar, del resto celular de la médula ósea, las células madre. En 1988, Gerald J. Spangrude e Irving L. Weissman, de la Universidad de Stanford, con varios colaboradores, clasificaron todas las células de médula ósea de ratón recurriendo a una serie de anticuerpos monoclonales, proteínas complejas que se unen sólo a antígenos en tipos celulares específicos. E identificaron una subpoblación, en cuantía inferior al 0,1 por ciento de las células de médula ósea, que causaba la recuperación permanente del sistema inmune y del hematopoyético de ratones expuestos a niveles letales de radiación.

Esta subpoblación, por lo que parece, abunda en células madre primitivas. Los ratones sometidos a irradiación letal sobrevivían el 50 por ciento del tiempo si se les inyectaba sólo el 30 de estas células. El equipo de Ihor R. Lemischka, de la Universidad de Princeton, realizó experimentos similares para separar células madre de hígado de feto de ratón, y ha descubierto también una subpoblación celular, formada por el 0,1 al 0,2 por ciento de las células del hígado fetal, que contiene la célula madre totipotente.

En 1984, Curt Civin, de la Universidad Johns Hopkins, aisló un anticuerpo monoclonal que reconoce una línea celular leucémica (KG-1) ya conocida, desarrollada en la Universidad de California en Los Angeles por H. Phillip Koeffler y el autor. El anticuerpo de Civin se mostró eficaz para delatar a la célula madre humana, pues reacciona con el antígeno CD34, un marcador celular proteico que se halla en las células madre primitivas y en otras precursoras de células de la sangre derivadas de la célula madre totipotente. Las células que se unen al anticuerpo de Civin pueden separarse del resto de la población. En mandriles, las células CD34 de médula ósea separadas han conseguido reconstituir el sistema hematopoyético de receptores sometidos a radiación letal. Por ello debe haber células madre pluripotentes entre las células de médula ósea CD34 positivas, aunque estas células madre primitivas constituyan una pequeña parte de la población.

Otros han ideado nuevos métodos para aislar ulteriormente las células madre a partir de las células que se unen a CD34. En ese contexto, el equipo de Charles Baum, de Systemix, Inc., se ha apuntado éxitos en la separación de las verdaderas células madre humanas por medio de anticuerpos monoclonales que seleccionan positiva o negativamente el carácter "maternidad". El grupo de Baum ha seguido un enfoque original; trabaja con ratones blancos inmunodeficientes, los SCID, que portan implantados fragmentos de timo y hueso humanos. Las células madre humanas aisladas, e inyectadas luego en los ratones, se replican rápidamente y se diferencian, po-





2. SUPERFICIES DE MEDULA OSEA ARTIFICIALES, o capas de estroma. Esas superficies permiten abordar el comportamiento de las células madre y células sanguíneas derivadas en cultivos a largo plazo. Los cultivos de médula ósea (*a*) contienen muchas de las células, hormonas y otras

blando los fragmentos tímicos con linfocitos humanos y los trozos de hueso con células mieloides primitivas. Gracias a lo cual podemos estudiar las células madre humanas en el organismo.

Con la mirada puesta en la terapia, al autor le gustaría controlar la diferenciación de la célula madre y replicar la célula madre pluripotente. Ignoramos en virtud de qué decide la célula madre replicarse o diferenciarse. A propósito de la diferenciación se distinguen dos escuelas: determinista y estocástica. La visión determinista sostiene que las influencias exteriores, señales hormonales incluidas, dirigen la diferenciación de la célula madre. Para la visión estocástica, la decisión de autorrenovarse o diferenciarse, así como el linaje a seguir, ocurren al azar.

Para ayudar a dirimir la cuestión, Makio Ogawa, de la Universidad Médica de Carolina del Sur en Charleston, diseñó un método de desarrollo de colonias de células madre humanas en un gel semisólido. De colonias en un estadio precoz de formación separó células, una a una, para crear con ellas colonias secundarias. Descubrió que en estas colonias secundarias las células se desarrollaban en varios tipos, prueba de que las células madre de las colonias originales se diferenciaban al azar a lo largo de varias líneas. Cuando separaba pares de células madre que se habían vuelto a dividir para establecer dos colonias independientes, Ogawa se encontró con que éstas también mostraban diferenciación al azar. Tales resultados son coherentes con un modelo estocástico de comportamiento de las células madre.

De acuerdo con la hipótesis determinista, el entorno químico dirige la diferenciación de las células madre, o las compromete al menos con una de las distintas vías posibles de desarrollo. Las células de soporte (células del estroma) y varias moléculas que se unen con las células madre en la médula podían aportar señales para la diferenciación de las células madre en formas que no pueden medirse cuando las colonias se estudian en cultivos carentes de tejidos de soporte.

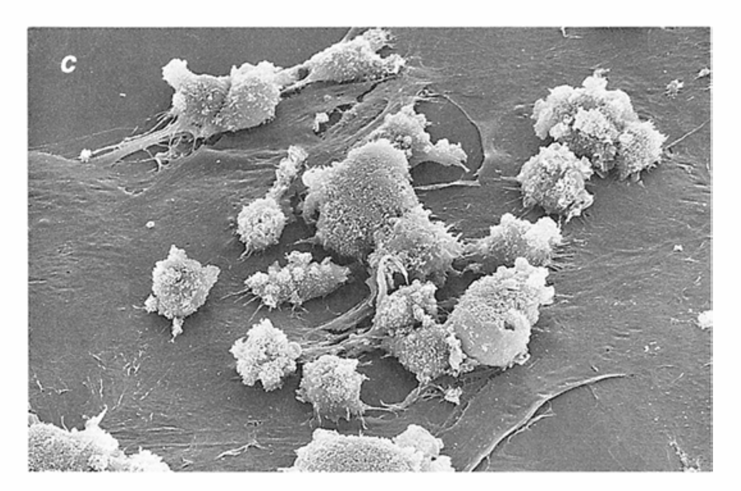
Llegado cierto momento, la célula madre expresa los receptores que la hacen sensible a las hormonas que regulan la producción hematopoyética; es decir, se encuentra ya capacitada para proliferar en respuesta a la señal hormonal. Se trata de una etapa crítica en el proceso de diferenciación. Nadie sabe, sin embargo, qué regula la expresión inicial de estos receptores, ni qué receptores existen en las células más primitivas, las células madre totipotentes. De lo que yo infiero que no existe contraposición excluyente entre la teoría estocástica y la determinista; más: probablemente ocurren ambos mecanismos.

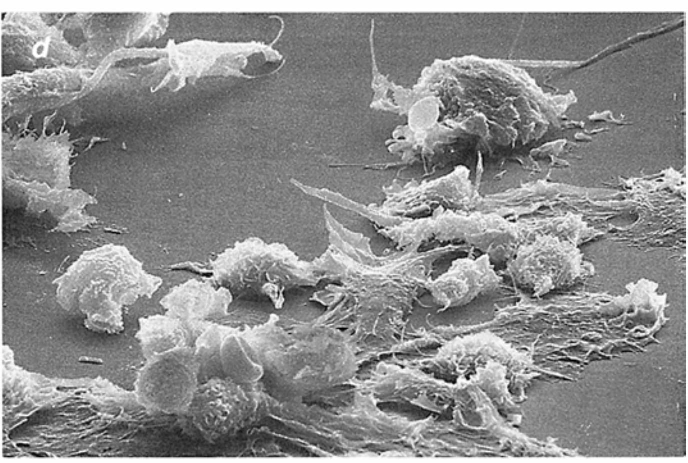
Para profundizar más en el comportamiento de las células madre habría que estudiarlas en el seno de la médula ósea, pero es un deseo hoy irrealizable. En los años setenta, el equipo de Michael Dexter, del Instituto Oncológico Paterson de Manchester, creó un sistema de cultivo de células madre humanas en el laboratorio, permitiendo así la observación de su crecimiento y desarrollo bajo condiciones similares a las que imperan en la médula ósea humana. En la médula, los tejidos del estroma proporcionan el marco propicio para el desarrollo de las células sanguíneas. En el sistema de Dexter, las células hematopoyéticas (incluidas las células madre) crecen en frascos que contienen una capa "artificial" de estroma de médula ósea. Esta capa consta de células y material orgánico extraído de la médula ósea.

En esa capa de cultivo encontramos muchos de los componentes de la médula natural: fibroblastos, células cebadas, células endoteliales y macrófagos. El cultivo contiene también proteínas de la matriz (colágeno, fibronectina, laminina y hemonectinas), que intervienen, según parece, en la replicación y diferenciación de la célula hematopoyética. Las células que tapizan el frasco sintetizan hormonas que regulan la división celular y otros aspectos de la producción y diferenciación de la célula sanguínea.

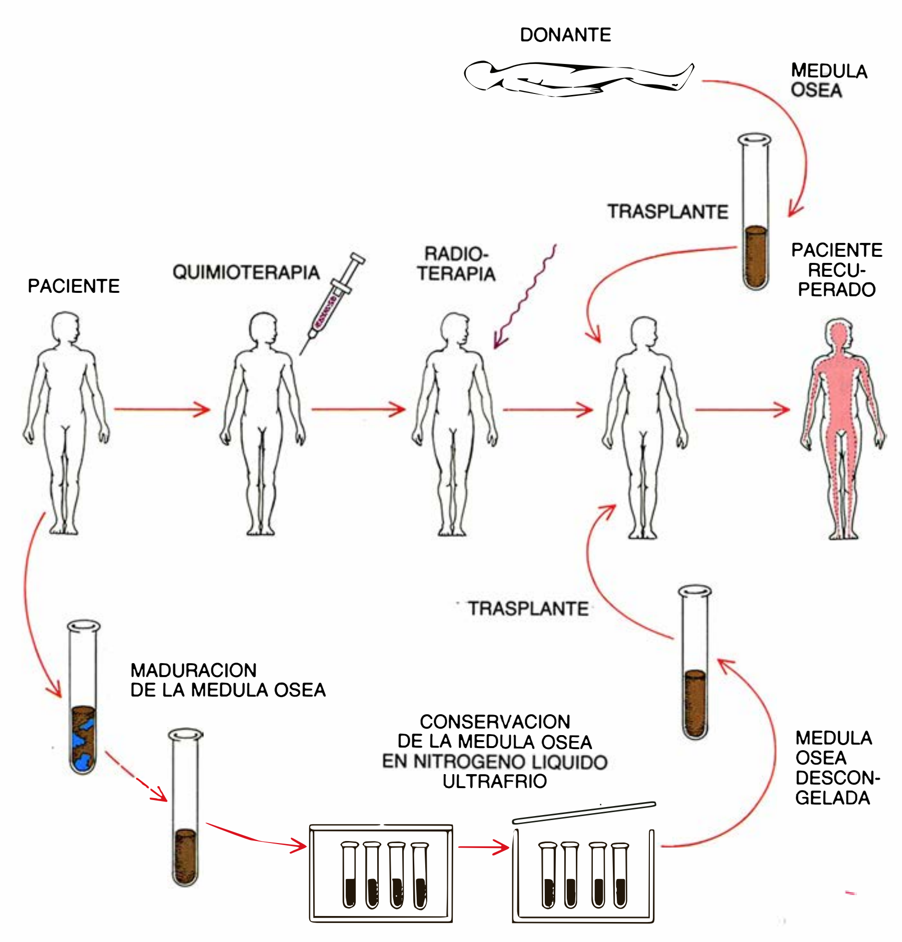
Otros constituyentes de la capa adherente podrían facilitar la acción de hormonas que promueven el crecimiento de las células sanguíneas. Los cultivos a largo plazo permiten que la producción de células sanguíneas continúe durante dos a tres meses, tiempo suficiente para que el bioquímico analice las influencias que condicionan el crecimiento y desarrollo de células madre, así como para identificar las funciones de varios componentes del estroma, de los que todavía sabemos muy poco. Algún día estos cultivos podrán convertirse en fábricas de células madre subsidiarias de la terapia de trasplantes.

Profundizando en estos estudios, varios experimentos recientes han revelado nuevos detalles acerca de la regulación de la hematopoyesis por factores hormonales y han puesto de manifiesto el modo en que el ambiente medular afecta la actividad de la célula madre. Quién duda de que esos factores revisten suma importancia para el tratamiento de enfermedades, por cuanto pudieran encerrar la clave que obliga a las células madre primitivas a replicarse. Se han hallado varias hormonas que estimulan la replicación de células tempranas, precursoras de las otras células sanguíneas, si bien algo diferenciadas y, por tanto, distintas de las células totipotentes genuinas. Entre esas hormonas citaremos el factor estimulador de colonias de granulocitos (G-CSF), interleucina-6, interleucina-11 y el factor de la célula madre, molécula descrita recientemente.





proteínas que se hallan normalmente en la médula. Durante varias semanas las células sanguíneas se desarrollan sobre la capa de estroma del cultivo (*b* y *c*). Por fin, las células sanguíneas se adhieren a la capa artificial e interaccionan con ella (*d*), tal como se sabe lo hacen en la médula ósea.



3. TRASPLANTE DE MEDULA OSEA en pacientes cuyas células madre han quedado dañadas por leucemias, cáncer o toxinas desconocidas. Los donantes de médula y los receptores deben ser hísticamente compatibles; de lo contrario las células madre trasplantadas no prenderían. La médula de un paciente puede guardarse a recaudo antes de recibir sesiones de quimioterapia o radioterapia antitumoral. Se le inyecta luego la médula para que sustituya las células madre destruidas.

Ponderemos el interés del factor de la célula madre. Se trata de la hormona que interacciona con un receptor celular producido por el oncogén celular *c-kit*. El receptor oncogénico existe en células pigmentarias (melanocitos) y células productoras de sangre. Se preparó una cepa de ratones anémica y con trastornos pigmentarios (que fabricara glóbulos rojos y melanocitos disfuncionales) y se comprobó que portaban también receptores oncogénicos *c-kit* defectuosos. No hace mucho se demostraba que otros tipos de ratones genéticamente anémicos, cuya médula ósea es defectuosa, carecen de la capacidad de producir el factor célula madre, factor que, sin duda, actúa sobre células madre verdaderas, por más que los datos disponibles niegan que sea el factor de autorrenovación persistentemente codiciado. Todos estos hallazgos arrojan luz esclarecedora sobre la conexión entre las hormonas de la médula ósea y el comportamiento de la célula madre.

La investigación sobre las células madre busca, en última instancia, una terapia más eficaz de las enfermedades de la sangre y del sistema inmune. Se trasplanta médula ósea en pacientes cuyos sistemas inmune y hematopoyético han quedado arruinados por la leucemia, el cáncer, la radioterapia y otras causas desconocidas. Hasta ahora, la única forma de disponer de un número suficiente de células madre consiste en extraer médula de un hueso del donante con una aguja y jeringa, un proceso harto delicado que suele aconsejar anestesia general.

Los trasplantes de médula ósea presentan múltiples dificultades. El destinatario debe recibir un suplemento equilibrado de glóbulos rojos frescos, plaquetas y antibióticos durante varias semanas hasta que las células madre trasplantadas comiencen a producir elementos sanguíneos maduros en abundancia. Hay que proceder a desarmar el sistema inmune del receptor para que no rechace las células madre trasplantadas. Por su lado, el sistema inmune desarrollado por las células madre del donante podría reputar foráneo o extraño a su nuevo hospedador —en una reacción conocida como enfermedad del injerto contra el huésped (EICH)— y destruir tejido y órgano. Quiere ello decir que se ha de proteger al receptor ante el posible ataque del nuevo sistema inmune.

Para el buen éxito del trasplante, se han de eliminar las células malignas de los que sufran leucemia aguda u otros cánceres sanguíneos. Se aconseja el injerto contra leucemia, que es una forma benigna de EICH; las células inmunes derivadas de las células madre del donante destruyen, o refrenan por lo menos, las contadas células leucémicas que quedan. Los análisis moleculares denuncian la presencia de una pequeña población de células leucémicas en pacientes que se dirían curados de leucemias mieloblásticas (con base medular) tras someterse a un trasplante medular alogénico. La capacidad manifiesta de las células madre trasplantadas para retener las células leucémicas en el receptor encierra un interés terapéutico, si bien resulta difícil de controlar porque el efecto del injerto contra leucemia guarda estrecha relación con el EICH.

Debido a que las células madre trasplantadas pueden reconstituir el sistema inmune, se ha recurrido a esa técnica a la hora de abordar las enfermedades genéticas en que los linfocitos presentan alteradas sus funciones; pensemos, por ejemplo, en el síndrome de inmunodeficiencia combinada grave. Se recomiendan también los trasplantes de célula madre en enfermedades metabólicas que trastornen los macrófagos: osteopetrosis (que da lugar a un aumento de la densidad ósea) y enfermedad de Gaucher grave (caracterizada por anemia y deformación de los huesos). Asimismo, los trasplantes de célula madre constituyen una terapia indicada contra los trastornos congénitos en los procesos hematopoyéticos, verbigracia, talasemia y drepanocitosis (defectos de la hemoglobina que transporta oxígeno en eritrocitos), anemia de Fanconi (un defecto de células madre que conlleva una insuficiencia de la médula ósea) y enfermedad granulomatosa crónica (defecto enzimático de los leucocitos).

Los donantes de médula suelen ser hermanos cuyos tejidos son compatibles y, a veces, individuos sin relación de parentesco cuyos tejidos, sin embargo, son compatibles con el receptor, tras la verificación por un proceso denominado tipificación del HLA. Dicha tipificación ofrece varias ventajas: se hacen accesibles las células madre a las personas sin parientes compatibles; podría haber, para un mismo receptor, varios donantes posibles, y puede ocurrir el efecto de injerto contra leucemia. En los Estados Unidos y en Europa existen muchos registros de HLA tipificados de donantes voluntarios.

A pesar de esos ficheros, la probabilidad de encontrar un donante com-

patible sin relación de parentesco es baja, aproximadamente 1 de cada 4 en la raza blanca. Cifra que baja muchísimo entre las minorías y descendientes de cruzamientos interraciales, ya que las minorías están poco representadas en los registros. Además, la médula injertada de un donante sin relación de parentesco no prende o es rechazada en el 10 o 20% de los casos; aproximadamente en el 50% de las veces ocurren EICH serios.

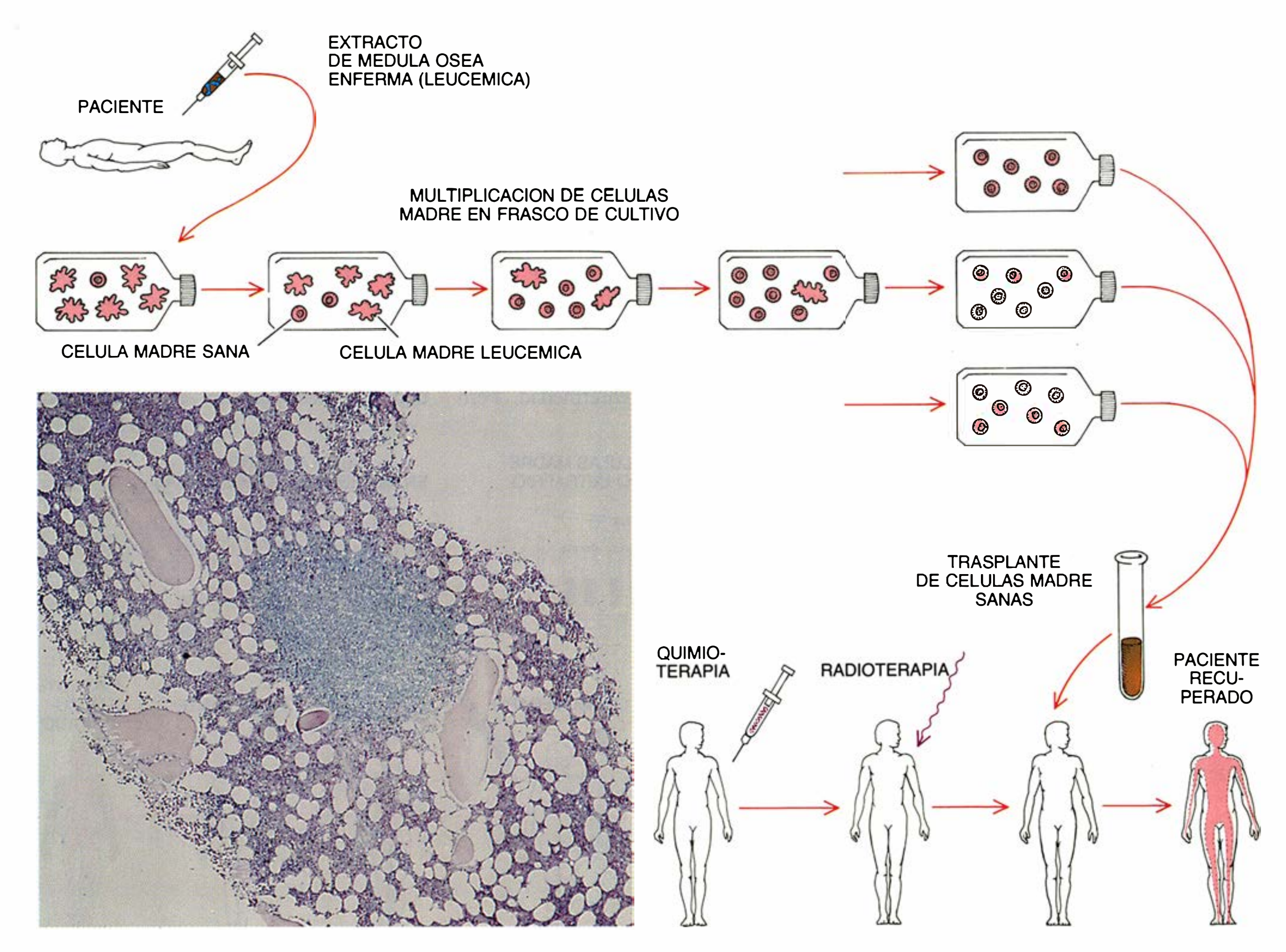
No es obligado que la médula sea donada por otra persona. En el trasplante autólogo, las células madre propias del paciente se extraen y guardan fuera del cuerpo, mientras se le administra quimioterapia o radioterapia para eliminar las células malignas. El trasplante autólogo admite la aplicación de dosis altas de quimioterapia e irradiación sin el riesgo de causar la destrucción permanente de la capacidad hematopoyética del paciente o la de generar su sistema inmune. La médula ósea, extraída, se congela y almacena, hasta su introducción directa en la vena. (Las células madre acaban por alojarse en la médula ósea.) De ese modo, los trasplantes autólogos de médula evitan los efectos potencialmente letales de cáncer inducido por quimioterapia sobre las células hematopoyéticas.

El trasplante autólogo elimina la necesidad de donantes compatibles y se orilla el peligro de EICH. Las células madre restauradas no producen un efecto de rechazo contra el tumor; los pacientes que más se beneficiarían de un trasplante autólogo podrían tener médula ósea invadida ya por células cancerosas, sobre todo si se padece leucemia o linfoma (cáncer que se desarrolla en el sistema linfoide).

La capacidad de separar las células madre malignas de las sanas en la médula ósea del paciente reportaría notables beneficios a la medicina, motivo por el cual los expertos se han esforzado en eliminar, a través de diversos métodos, las células malignas de la médula ósea. Así, unos recurren al uso de anticuerpos monoclonales que activen el complemento (enzimas destructoras que se unen a los anticuerpos) o que lleven toxinas unidas; otros se apoyan en la quimioterapia para tratar la médula extraída mientras se encuentra fuera del cuerpo, en su propósito de destruir las células madre malignas.

Pero ninguna de esas técnicas de eliminación ha alcanzado la eficacia necesaria y, lo que es peor, podrían retardar el arraigamiento de las células trasplantadas. Algunos han propuesto purificar la médula ósea de ciertas células tumorales mediante la eliminación de las células CD34 positivas. Ciertos anticuerpos monoclonales podrían, así parece, separar células madre normales de las leucémicas.

El equipo de Connie J. Eaves, de la Universidad de la Columbia Británica, y el grupo de Dexter han encontrado unos medios curiosos para abordar esa separación. Descubrieron que los sistemas de cultivo a largo plazo tendían a impedir el crecimiento de las células leucémicas en la médula, si se comparaba con el crecimiento normal de las células madre. Ambos grupos examinaron la relación entre células leucémicas y normales en cultivos de médula ósea de pacientes leucémicos. Y observaron que, mientras las células leucé-



4. CULTIVOS DE MEDULA OSEA con el fin de estimular la rápida reproducción de las células madre sanas, en comparación con las leucémicas. De aquí a cierto tiempo, debería poderse obtener una población de células madre sanas a partir de médula enferma (como ocurre en la médula afectada de linfoma que muestra la imagen). Y conseguido ello, los pacientes podrían someterse a un tratamiento de quimioterapia o radioterapia para matar sus células enfermas y recibir luego una inyección de células madre sanas derivadas de su propio organismo.

micas crecían en el cuerpo mejor que las células madre normales, quedaban en franca desventaja en los cultivos a largo plazo. Se han aducido comprobaciones similares en células leucémicas diferentes; y cabe admitir también, para otros tumores, la existencia de un crecimiento preferente de las células madre normales. Eaves, Dexter y sus colaboradores vienen ensayando sistemas de cultivo a largo plazo con el propósito de acabar con las células leucémicas de médula ósea, sin dejar mantener el suministro de células madre sanas; su método y estrategia general parecen prometedores.

Con independencia de su origen, las células madre deben trasplantarse en grandes cantidades para que los sistemas inmune y hematopoyético del paciente se restablezcan rápidamente, aunque no sabemos cuál sea el número de células madre requerido para que un injerto tenga éxito. Porque ignoramos cuántas células madre hay en una determinada muestra de médula ósea, mis colegas y yo hemos de basarnos en experiencias y extrapolaciones de datos obtenidos en animales para estimar la dosis de células necesaria en un trasplante humano. Y así parece necesario trasplantar 200 millones de células de médula ósea por kilogramo de peso corporal. Las dosis inferiores refuerzan el riesgo de trasplantes fallidos o simplemente rechazados. Esa cuantiosa demanda de células de médula ósea obliga a realizar múltiples extracciones. Se aspiran de 500 a 1000 mililitros de médula ósea del donante, se filtran luego y se aplican al sujeto receptor o bien se almacenan congeladas para un posterior trasplante en el propio donante.

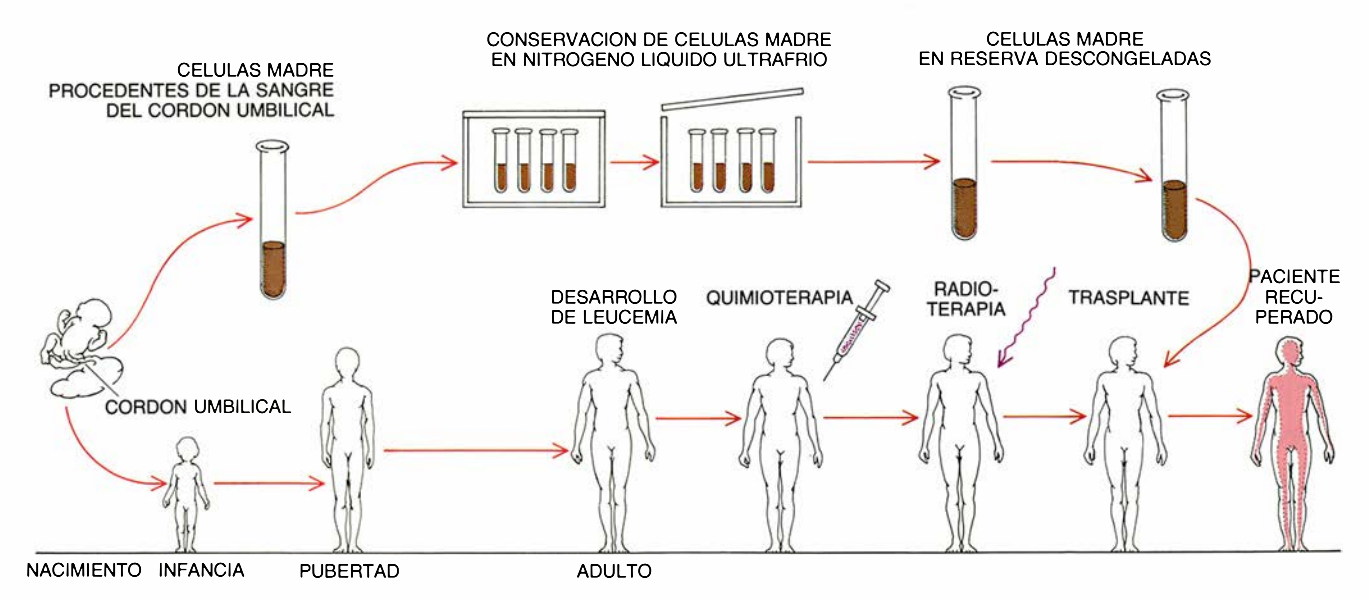
Se daría un gran paso en los trasplantes de médula ósea si se lograra avivar el proceso de arraigamiento (o prendimiento) del injerto. La investigación médica demuestra que la administración de las hormonas GM-CSF y G-CSF, estimuladoras de la hemopoyesis, acortan notablemente el tiempo necesario para que las células madre prendan y para que el número de leucocitos periféricos vuelva a niveles normales.

Esas hormonas podrían encerrar más posibilidades. Algunos han observado que, si añadían células madre obtenidas de sangre periférica a las de médula ósea, se aceleraba la velocidad de arraigamiento. La extracción de un número suficiente de células madre procedentes de la sangre periférica constituye un proceso complicado, que requiere el paso reiterado de la sangre a través de un separador de células. La administración de GM-CSF y G-CSF aumenta drásticamente el número de células madre en sangre, lo que facilita, a su vez, el trasplante de células madre procedentes de sangre periférica.

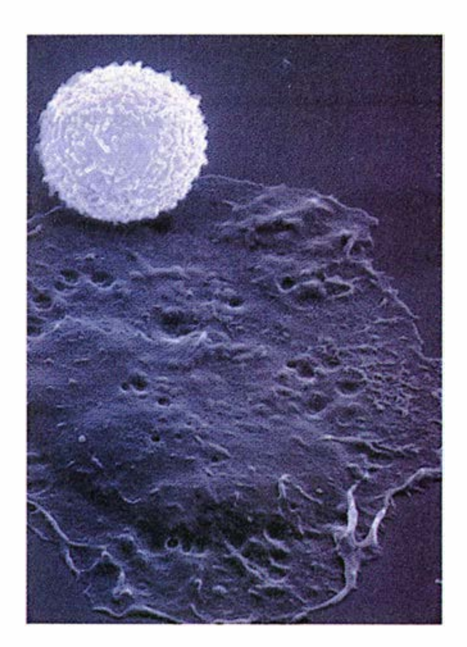
El advenimiento de técnicas eficaces para el aislamiento de muestras puras de células madre pluripotentes y para acelerar el proceso de prendimiento del injerto abrirá la puerta a nuevas estrategias de almacenamiento y trasplante de médula ósea. Si bastara, por ejemplo, una sola extracción de médula realizada bajo anestesia local (entre 10 y 15 mililitros de médula) para aportar la cantidad celular exigida en el trasplante, el sujeto podría reservar sus propias células bien conservadas para un trasplante ulterior. Sería, asimismo, menos oneroso el proceso de donación de médula.

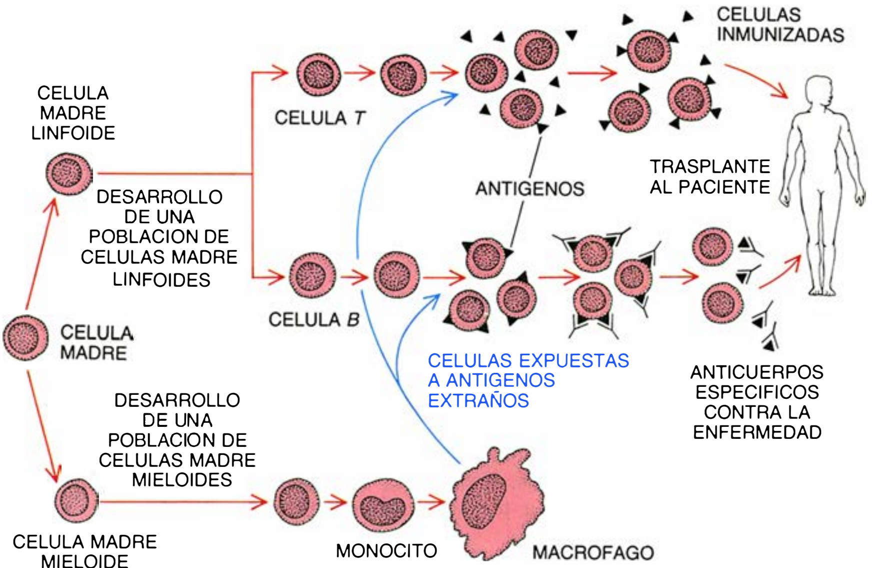
Los individuos sanos podrían tener sus propias células madre a resguardo en previsión de una enfermedad. Pero no disponemos todavía de una técnica normalizada de extracción rutinaria de médula y almacenamiento de células madre para un amplio segmento de la población. Pero se avanzaría muchísimo si se creara un método para el cultivo *in vitro* de esas células. Los cultivos a largo plazo descritos antes permiten mantener las células madre vivas; el refinamiento de dicha técnica posibilitaría que un cultivo seminal de células se desarrollara en una población de cierto tamaño. La administración de hormonas hematopoyéticas (GM-CSF y C-CSF) podría facilitar luego la replicación de esas células madre en el cuerpo al que se han trasplantado. El refuerzo del arraigamiento aportado por tales hormonas, junto con la perspectiva que ofrecen de inducir la replicación rápida de las células madre, dentro y fuera del cuerpo, avivan la esperanza de lograr pronto trasplantes eficaces a partir de una pequeña muestra de células madre.

La sangre del cordón umbilical podría convertirse en fuente vigorosa de cultivos iniciadores. Desde hace veinte años se sabe que la sangre del cordón contiene precursores de células sanguíneas. Apoyándose en colonias de células madre, Ogawa demostró en 1987 que la sangre del cordón umbilical poseía células madre pluripotentes. Edward A. Boyse, del Centro Oncológico Memorial Sloan-Kettering, Harold E. Broxmeyer, de la Universidad de Indiana, y Elaine Gluckman, del Hospital Saint-Louis de París, debatieron el uso de sangre del cordón umbilical en la terapia de trasplantes. A dos pacientes que sufrían anemia de Fanconi, comentaron, se les trasplantó con éxito células madre obtenidas del cordón umbilical de hermanos con HLA idéntico. No hace mucho, en el Instituto



5. SANGRE DEL CORDON UMBILICAL, portadora de células madre activas. Ante la posibilidad de almacenamiento prolongado que ofrecen las células sanguíneas del cordón umbilical, el individuo debería contar, en previsión, con un suplemento de células madre sanas y compatibles.





6. PREPARACION DE CELULAS DE LA SANGRE para acometer nuevas terapias, muy radicales. A partir de cultivos de célula madre podrían producirse linfocitos (*arriba, a la izquierda*) y macrófagos (*abajo, a la izquierda*). Los linfocitos *T* podrían ser expuestos a antígenos y entonces liberados en el cuerpo, donde destruirían las células cancerosas o infectadas por virus. De un modo similar, podrían ejercitarse los linfocitos *B* en la síntesis de anticuerpos contra trastornos o enfermedades específicas. Los macrófagos traen los antígenos a la presencia de las células *T* y *B*.

de Oncología Johns Hopkins se acertó en el tratamiento de un paciente de cuatro años con leucemia al trasplantarle células sanguíneas de cordón umbilical.

La sangre del cordón umbilical, que se desecha después del parto, podría constituir una valiosa fuente de células madre disponibles de por vida para el individuo. Las células madre y los linfocitos procedentes de la sangre del cordón umbilical no presentarían resistencia a enfermedades adquiridas durante la vida; y reconstruirían un sistema inmune "virgen" o inexperto, que necesitaría tiempo para adquirir las formas apropiadas de inmunidad contra la enfermedad.

El almacenamiento rutinario y generalizado de células madre hematopoyéticas recogidas al nacer tendría profundas implicaciones médicas. Se contaría con el aporte necesario de las mismas para situaciones de trasplante autólogo, y se orillarían los problemas asociados con la eliminación de células tumorales presentes en la sangre o médula ósea enferma. Habría, asimismo, la dotación requerida en trasplantes alogénicos, aunque esto plantearía serios problemas logísticos y éticos.

La perspectiva de almacenar células madre del propio individuo, listas para su empleo en cualquier momento, abre las puertas de la esperanza para aquellas enfermedades que impliquen la reconstitución del sistema hematopoyético. Con el desarrollo de determinadas líneas de células madre en el laboratorio, vendrán otros progresos: obtención de células madre de un paciente, su manipulación para cumplir un cometido terapéutico y su reintroducción en el paciente. Estamos imaginándonos la posibilidad de modificar las células madre hasta el punto de que, una vez trasplantadas, se diferencien en células inmunes capaces de llevar a cabo nuevas funciones específicas; o la posibilidad de alterar células inmunes en estados más avanzados del desarrollo (por ejemplo, desarrollo de linfocitos *B*, especializados en la producción de anticuerpos, y su inmunización en cultivo para que produzcan anticuerpos contra enfermedades específicas).

El abanico de posibilidades es enorme. ¿Podremos "educar" a las células *B* mantenidas *in vitro* para que sinteticen anticuerpos contra células cancerosas o contra el virus de la inmunodeficiencia adquirida y otros agentes infecciosos? ¿Podríamos cultivar y multiplicar en el laboratorio células *T* citotóxicas (leucocitos "asesinos") dotados de sensibilidad específica para reconocer y destruir células tumorales o infectadas por virus?

No estamos hablando de sueños de una noche de verano. David Baltimore, de la Universidad de Rockefeller, ha sugerido que las células *T* autólogas podrían adquirir resistencia contra la infección por HIV (virus del SIDA), en una suerte de "inmunización intracelular". Eli Gilboa, del Sloan-Kettering, ha aislado del HIV el gen *tar*, que une y bloquea una proteína que el virus necesita para su replicación. Gilboa ha introducido ese gen en linfocitos en cultivo. Las células cultivadas que expresan el *tar* oponen resistencia a la infección por HIV. Queda por ver si estas técnicas que funcionan en tubo de ensayo operan *in vivo*.

La investigación tenaz nos traerá nuevos adelantos en el tratamiento de las enfermedades humanas, que abarcarán múltiples modos de ordenar e incrementar las defensas del organismo. La atención a la prevención podría incluir el fortalecimiento específico y general de las células del sistema inmune redoblando su eficacia contra el ambiente biológico hostil que las rodea. El papel central de la célula madre en el crecimiento y mantenimiento del sistema hematopoyético e inmune será decisivo para conseguir esa meta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HAEMATOPOIESIS: SEARCHING FOR STEM CELLS. Norman Iscove en *Nature*, vol. 347, n.º 6289, págs. 126-127; 13 de septiembre de 1990.

HEMATOPOIETIC STEM CELLS, PROGENITOR CELLS, AND GROWTH FACTORS. P. J. Quesenberry en *Hematology*, 4ª edición. Dirigido por W. J. Williams, E. Beutler, A. J. Erslev y M. A. Lichtman. McGraw-Hill, 1990.

AUTOLOGOUS BONE MARROW TRANSPLANTATION. Subhash Gulati, Joachim Yahalom y Carol Portlock en *Current Problems in Cancer*, vol. 15, enero-febrero de 1991

MOUSE HEMATOPOIETIC STEM CELLS. G. J. Spangrude, L. Smith, N. Uchida, K. Ikuta, S. Heimfeld, J. Friedman e I. L. Weissman en *Blood*, vol. 78, n.º 6, págs. 1395-1402; 15 de septiembre de 1991.

Perfiles

John Horgan

EDWARD WITTEN: *encantador de supercuerdas*

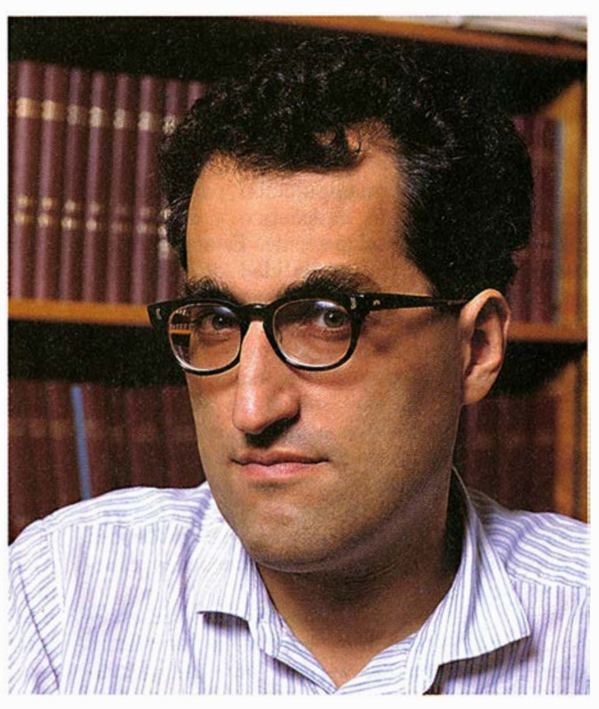
Edward Witten no es de los que se lo piensan dos veces para curvar una dimensión —el tiempo, pongamos por caso—, si le conviene. Es el paladín de la teoría de las supercuerdas, que sostiene que todos los fenómenos físicos —de los quarks a los cuásares— tienen su origen en cuerdas infinitesimales que se enroscan en no menos de 10 dimensiones. Frente a los que aducen que esta teoría, anclada en la matemática, no ha aportado contribuciones sustantivas a la física, Witten replica que, por el contrario, "todas las ideas realmente grandes de la física" son "vástagos" de las supercuerdas.

La relatividad general, por ejemplo. Desde luego, Witten es consciente de que Einstein concibió la teoría, que explica la gravedad como una función de curvas en el espacio y el tiempo, más de medio siglo antes de que se supiera de las supercuerdas. Pero Witten le llama a eso "un mero accidente de la evolución en el planeta Tierra". Es más probable, dice, que "otras civilizaciones del universo" descubrieran la teoría de las supercuerdas primero y de ella derivaran la relatividad general.

No estamos ante la exageración del científico estrafalario en busca de notoriedad. A sus 40 años, este profesor del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton es considerado como el más brillante físico de su generación y de las inmediatas. La comparación más socorrida es con Einstein. Pero John H. Schwarz, pionero él de las supercuerdas en el Instituto de Tecnología de California, se remonta más atrás; en su opinión no hubo mente matemática tan poderosa desde Newton.

La reputación de Witten se consolidó hace siete años, cuando situó en las supercuerdas el objetivo final de la física: una teoría que pudiera explicar todas las fuerzas de la naturaleza. Tal teoría se denomina a veces "teoría de todo", aunque a él le desagrada la expresión. "Witten no es el que dio con la teoría de las cuerdas", dice Michio Kaku, de la Universidad Municipal de Nueva York, "pero fue todo un acontecimiento cuando dijo: 'es esto', y haciendo luego profundas contribuciones a la misma".

Los incrédulos temen que Witten pueda ser una especie de flautista de Hamelin que arrastre en pos de sí a sus seguidores lejos de la realidad, hacia el mundo fantasmagórico de la matemática pura. Señalan que las supercuerdas, cuya relación de tamaño con el protón viene a ser la del protón con el sistema solar, no parece que se detecten ni ahora ni dentro de un milenio. Y la misma suerte pueden correr las dimensiones adicionales en las que habitan.



EDWARD WITTEN espera cortar el nudo gordiano del corazón de la realidad física. Fotografía de John Pinderhughes.

Uno de los pocos escépticos que permiten grabar sus conversaciones (diríase que con ganas de hacerlo) es Sheldon L. Glashow, de la Universidad de Harvard. No se anda por las ramas: niega que la teoría sea física, sólo se trata de "bambalinas" matemáticas. Se queja, como otros críticos, de la impenetrabilidad de la teoría. "No entiendo los últimos artículos de Ed", dice Glashow, galardonado con un premio Nobel de física, "así que no puedo saber cuán brillante es".

Witten hace caso omiso de las críticas, al tiempo que denuncia que nadie haya profundizado en la teoría, por lo que admite que pueden pasar décadas antes de que nos ofrezca una descripción precisa de la naturaleza. El está seguro de que es el camino hacia la verdad. "Las buenas ideas equivocadas son rarísimas, y jamás se han visto buenas ideas equivocadas que rivalicen ni remotamente con la majestad de la teoría de las cuerdas", manifiesta.

Antes de entrevistar a Witten había leído que sus alumnos de la Universidad de Princeton, donde enseñó hasta 1987, le llamaban "el marciano". Al encontrármelo, entendí la razón. Su cuerpo alto y delgado parece un añadido tardío a la cabeza. Habla con un tono de voz muy débil, con grandes pausas, la mirada caída y apretando los labios como un adolescente tímido; diríase que le obsesiona la precisión matemática.

Pero no es una persona reticente, en absoluto. No me he sentado y ya me recrimina el perfil publicado de Thomas S. Kuhn, quien cree que la ciencia es "arracional"; debería, me aconseja, redimir el papel malgastado con las "tontas" ideas del filósofo de la ciencia con cinco perfiles de otros tantos matemáticos. Aunque Witten es hijo de un físico teórico y siempre ha tenido gusto por la física, llegó a esta disciplina por una ruta tortuosa. Inició su formación en el Brandeis College hasta licenciarse en historia en 1971, con el proyecto de dedicarse al periodismo político. Comenzó a publicar artículos en distintos periódicos y se enroló en la campaña electoral de George McGovern en 1972. Alguien le insinuó que cambiara de oficio. Y se puso a estudiar física en Princeton, donde se doctoró en 1976.

Witten también siguió un camino retorcido hasta llegar a las supercuerdas.

Sus primeros trabajos se centraban en los temas fundamentales de la física, de directo acceso a la experimentación. Escribió numerosos artículos sobre la cromodinámica cuántica, que explica la fuerza fuerte que mantiene unidos los núcleos atómicos. También se planteó algunas cuestiones de la teoría electrodébil.

Pero fue derrotando cada vez más hacia esquemas más especulativos de unificación que contemplaban más dimensiones. La clave para entender esas teorías —y la física moderna en general— reside en la noción de simetría. Hay varios tipos de simetría, desde la simetría rotacional que posee una esfera hasta variedades más complicadas que se aplican a la intercambiabilidad de las partículas. Para abordar las simetrías ocultas de un sistema, los físicos suelen imaginárselo desde una perspectiva en más dimensiones.

Trabajó en dos aproximaciones de mayores dimensiones —llamadas supersimetría y teoría de Kaluza-Klein— que encontrarían un lugar en las supercuerdas. La supersimetría postula una simetría subyacente (y con ello intercambiabilidad) entre las partículas constitutivas de la materia y las que transmiten las fuerzas. Una de las consecuencias que se deducen de la supersimetría es que todas las partículas elementales conocidas tienen gemelas supersimétricas, las *s*partículas. La teoría de Kaluza-Klein postula la existencia de dimensiones adicionales que se hallan enroscadas o "compactadas": son indetectables en el dominio de lo macroscópico. El proceso de compactación se corresponde con el arrollamiento de una hoja de dos dimensiones para formar un canuto, o arrugarla hasta convertirla en una bola.

De esas ideas, de la supersimetría en particular, se valió para discernir las profundas similitudes que subyacen bajo las fuerzas de la naturaleza. Pero ninguna de esas aproximaciones pudo superar la barrera de la unificación completa: la incompatibilidad entre las teorías cuánticas, que explican el electromagnetismo y las fuerzas nucleares, y la relatividad general, la teoría de la gravitación. Ahí reside "el mayor misterio de la física".

La teoría de las supercuerdas tenía su historia autónoma, antes de la llegada de Witten. La noción de cuerda surgió a finales de los sesenta, cuando Gabriele Veneziano, del CERN, y Yoichiro Nambu, de la Univeridad de Chicago, propusieron que la interacción fuerte podía ser producida por partículas en forma de cuerda. El interés por esta teoría decayó cuando otros físicos demostraron que sólo funcionaba en 26 dimensiones. Así las cosas, en los setenta Schwarz, del Caltech, y otros combinaron el concepto de cuerda con el de supersimetría para tejer una teoría, mucho más ambiciosa: la de las supercuerdas; a la manera de las cuerdas de violín, que producen notas distintas, las vibraciones de las supercuerdas producen las partículas con masa y todas las fuerzas que actúan sobre ellas, gravedad incluida.

A pesar de que la teoría de las supercuerdas sólo requería 10 dimensiones en lugar de 26, a la mayoría de los físicos les seguían sobrando seis. Los escépticos quedaron también desconcertados por el hecho de que la teoría barajase energías y distancias de un orden de magnitud fuera del alcance de cualquier acelerador del mundo.

Witten tomó contacto con la teoría de las supercuerdas en 1975, pero sus primeros intentos por comprenderla se frustraron ante la "opacidad" de la bibliografía. En 1982, sin embargo, un escrito de Schwarz le ayudó a entender un hecho esencial: la teoría de las supercuerdas no se limita a admitir la posibilidad de la gravedad, la exige. "Sentí entonces la mayor convulsión intelectual de mi vida."

En un artículo de 1984 escrito con Luis Alvarez, de Princeton, señalaba un problema que debería superar la teoría de las supercuerdas y cualquier otra teoría unificadora que incluyera la gravedad. El problema tenía que ver con anomalías, o incoherencias matemáticas, que surgían cuando tales teorías intentaban explicar un tipo asimétrico de desintegración nuclear.

Más avanzando ese mismo año, Schwarz y Michael B. Green, del Queen Mary College de Londres, publicaron un artículo donde demostraban la posibilidad de eliminar las anomalías en la teoría de las supercuerdas. Witten lo vio claro: "Percibí que, si no me dedicaba por entero a la teoría de las cuerdas, perdería la oportunidad de mi vida." Empezó calificando de "milagro" a la teoría y profetizando que "dominaría la física durante los próximos 50 años". Y lo que es más importante, lanzó una avalancha de artículos sobre la teoría: 19 en 1985 solamente.

Los primeros trabajos pretendían aportar un modelo que reprodujera razonablemente el mundo real. El y otros, fundados en la teoría de Kaluza-Klein, describieron el mecanismo verosímil de compactación de las seis dimensiones adicionales. Sugirieron cómo podrían afectar estas dimensiones ocultas a las interacciones de partículas en el rango de energías alcanzables por los aceleradores actuales. En el CERN y en otros sitios se investiga en esa línea.

Witten está convencido de que, para convertir las supercuerdas en modelo predictivo, deberán descubrirse sus "principios geométricos intrínsecos". Estos principios, dice, pueden ser análogos a la geometría no euclídea inventada en el siglo XIX por Bernhard Riemann. De haber carecido de esta técnica para modelar curvaturas en el espacio y el tiempo, Einstein no hubiera formulado la teoría de la relatividad.

De ahí su incursión en el mundo de la topología, que estudia las propiedades geométricas fundamentales de los objetos sin importar su tamaño o forma particular. Así, a ojos de un topólogo no son diferentes una rosquilla y una taza de café con un asa, puesto que ambas presentan un solo agujero.

Witten ideó la teoría topológica cuántica de campos, que combina la topología con los instrumentos matemáticos de la teoría cuántica de campos. Ese recurso teórico le permite desvelar simetrías incluso más profundas que con los métodos tradicionales de la física. Hace poco, aplicó la técnica operando sobre la teoría de nudos de Vaughn F. R. Jones, matemático de la Universidad de California.

La teoría de nudos se pregunta si pudiera ser que lo que parecen nudos diferentes sean en realidad topológicamente equivalentes, esto es, si puede pasarse de uno al otro sin ningún corte. Jones había demostrado cómo averiguarlo con una ecuación polinómica de la mecánica estadística, la misma que describe el transporte de calor y otras propiedades generales en un sistema complejo.

Posteriormente, Witten demostró que con la teoría topológica cuántica de campos se podían encontrar unidades más profundas entre nudos, esto es, simetrías, que con la técnica de Jones. También se podían discernir simetrías subyacentes a los nudos en espacios curvos no euclídeos, subyacentes incluso a los espacios mismos. Fue éste "el más gratificante de los trabajos que he realizado"; por él recibió, en 1990, la medalla Fields, el premio más prestigioso de matemáticas, que compartió con Jones.

Rechaza que en su fascinación por aspectos tan matemáticos haya perdido perspectiva física. Aduce, a modo de ejemplo, que en 1985 escribió un artículo con Mark Goodman, de Princeton, proponiendo un método para detectar partículas exóticas, entre ellas las *s*partículas predichas por la supersimetría, que podrían dar cuenta de la "materia oscura" que muchos cosmólogos piensan que domina la estructura del universo. El artículo ha inspirado varios experimentos sobre la materia oscura.

Ciencia y sociedad

Sistema solar

Venus en el espejo

Con ilusionada impaciencia se están analizando las perfectas imágenes radáricas procedentes de la sonda *Magallanes*, que van arrancando, velo a velo, la asombrosa morfología del planeta Venus. A un año de las primeras imágenes, poseemos ya un atlas espléndido de su enigmático paisaje.

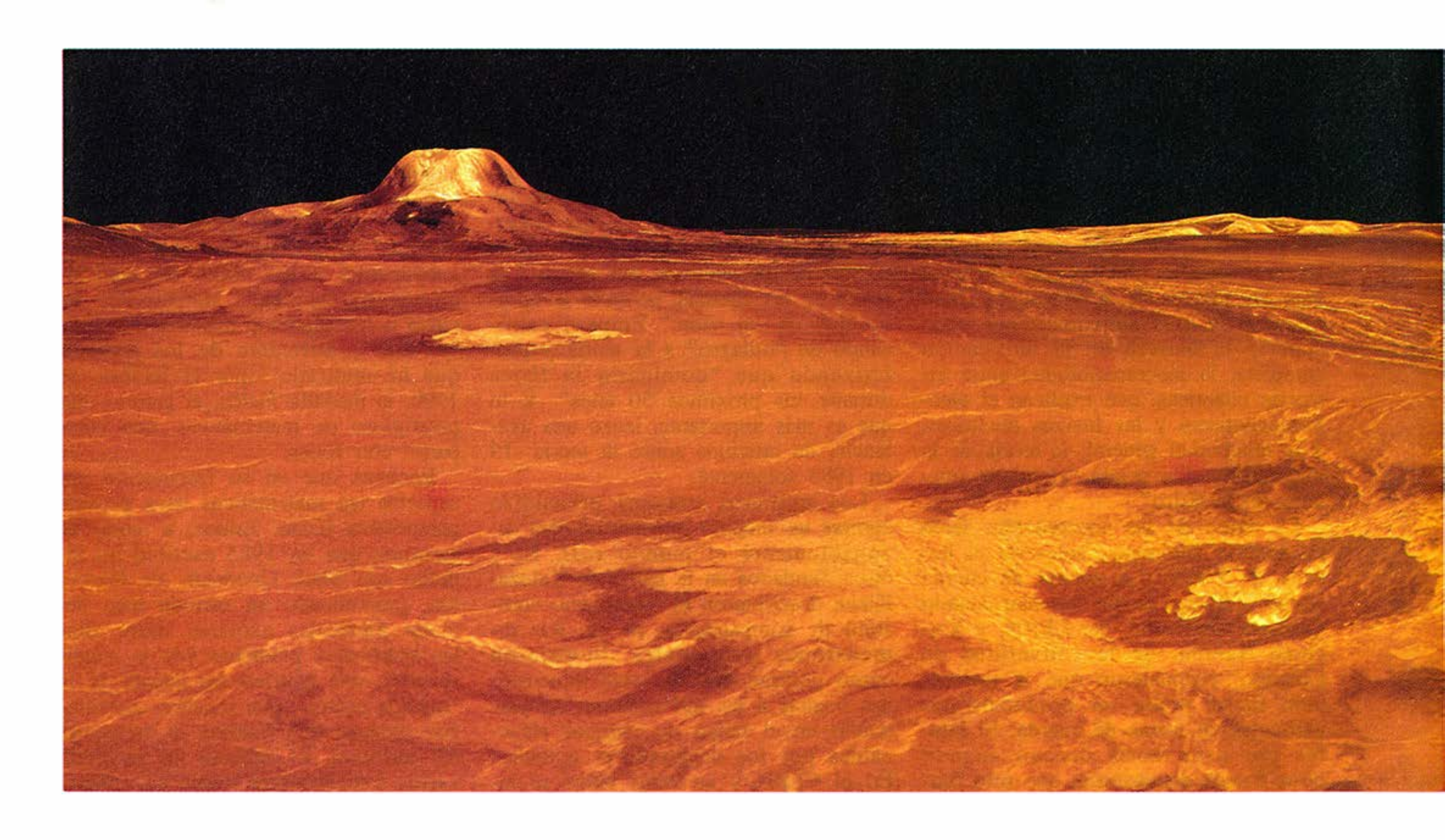
La Administración Nacional sobre Aeronáutica y Espacio (NASA) publicó recientemente los primeros mapas globales. Vemos en ellos cráteres de impacto distorsionados por la espesa atmósfera venusiana, volcanes con aspecto de tortas, redes intrincadas de fracturas, amén de un canal misterioso de lava que serpentea a lo largo de 6800 kilómetros de superficie. Los expertos, repartidos en grupos de trabajo, se aprestan a desentrañar la interconexión y el significado de esos fenómenos inesperados del relieve.

La velocidad del viento que sopla en superficie no supera el valor de algunos kilómetros por hora, aunque alrededor de ciertos cráteres su acción quede puesta de manifiesto. La huella de esa acción eólica apunta hacia el ecuador. Esa es la dirección predominante de la circulación atmosférica. El polvo de la atmósfera podría haberse convertido en un poderoso agente erosivo, o bien haberse incrustado en rocas abrasadoras de la superficie (475 grados Celsius). No es desdeñable la erosión química, de cuyo estudio se ocupa Raymond E. Ardvison, de la Universidad de Washington.

El planeta está tachonado de cráteres inmensos, que no muestran señales de haber sufrido notables transformaciones. Fijémonos en el de Cunitz, de 50 kilómetros de diámetro, cuyo nombre honra la memoria de la matemática Maria Cunitz. (Todos los nombres geográficos de Venus son de mujeres famosas o heroínas de la mitología.) La sonda *Magallanes* ha descubierto unos 850 cráteres, muchos menos de los hallados en la Luna o en Marte. ¿Débese ello a que los micromeoteoritos se desintegran en la atmósfera y los cráteres mayores han quedado sepultados por flujos de lava?

Uno de los accidentes geográficos más espectaculares de Venus es Gula, diosa de la mitología asiria. Abarca una extensión de cientos de kilómetros por sólo tres de altura. Creyóse en un comienzo que Gula podía ser un volcán activo, pero cuando la sonda obtuvo imágenes más detalladas se percibió el cráter de impacto y fracciones de materia expelida encima del flujo de lava que ceñía a Gula y a Sif, volcán gemelo.

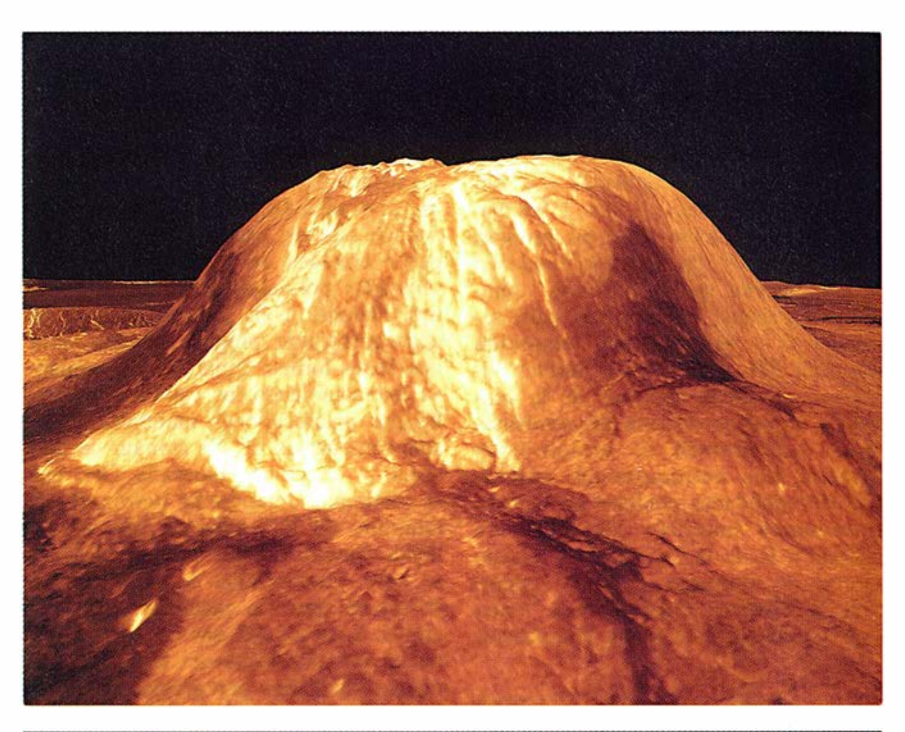
Los puntos encumbrados, pensemos en la cima de Gula, destacan por su brillo en las imágenes del radar de la sonda. Esa luminosidad pueden ocasionarla sulfuros de hierro u óxidos de hierro, eficientes reflectores del radar amén de verosímil material que remata los picos. Por eso llama la atención que el monte Maat, la segunda cumbre de Venus, aparezca obscura. Opinan unos que esa materia obscura de la cima es lava joven, que no ha sufrido el proceso de meteorización necesario para dejar en evidencia los materiales reflectores al radar. Según estas hipótesis, el monte Maat sería más joven que otros volcanes venusianos, aunque la meteorización procede con tanta lentitud que la lava podría ser antigua.



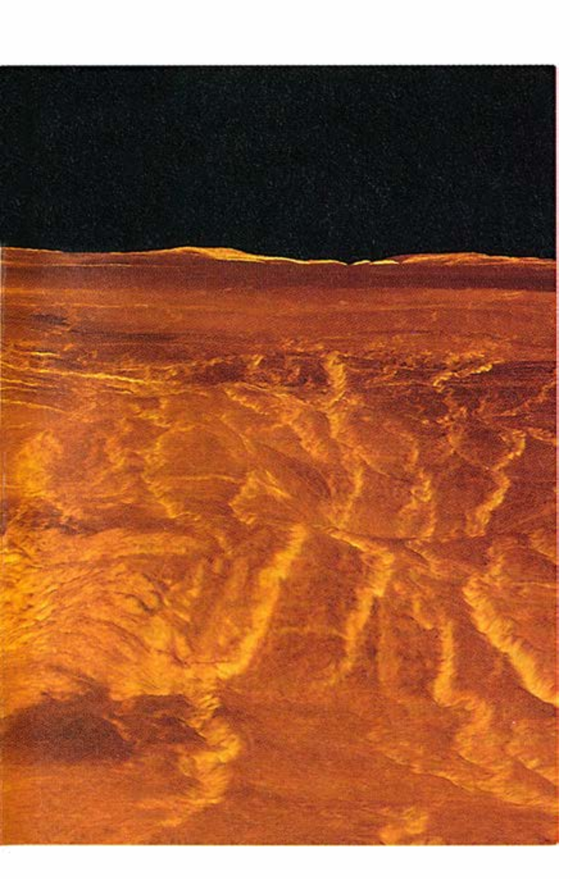
Se ha avanzando la hipótesis según la cual hace unos 500 millones de años se produjo un descomunal episodio de vulcanismo que modeló por entero la superficie del planeta. Otros opinan que la actividad volcánica no ha cesado nunca de conformar la piel de Venus, planeta que carece, a diferencia de la Tierra, de un proceso de tectónica de placas.

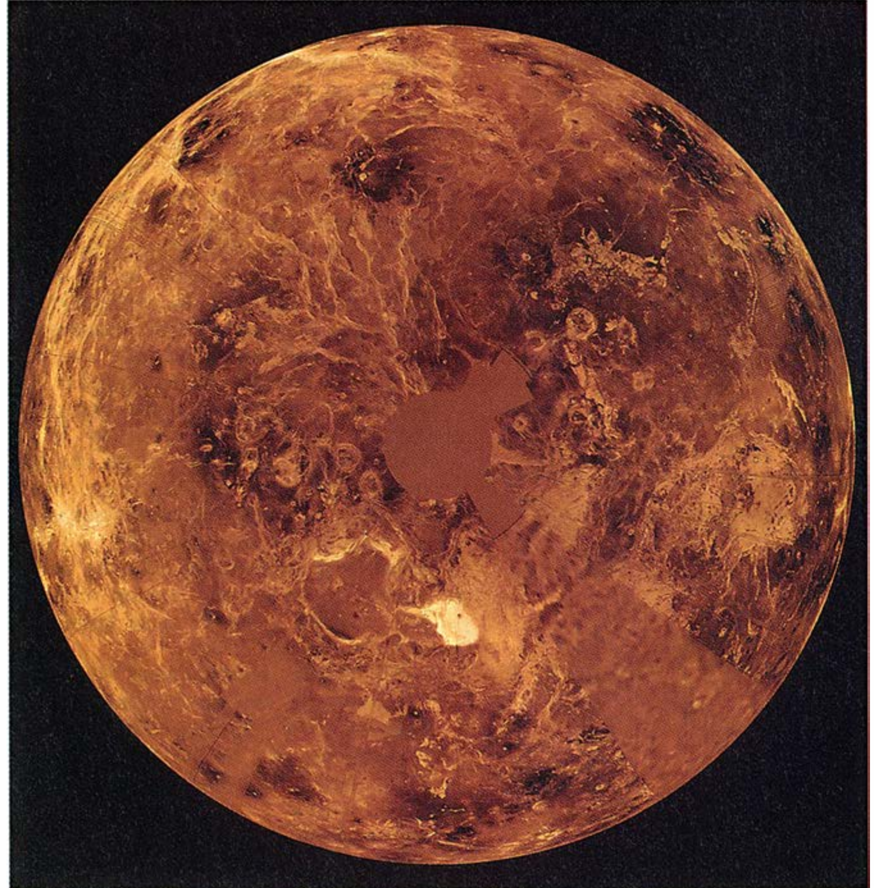
La topografía de Venus parece dominada por procesos de surgencia de materiales del interior y de hundimiento de capas superficiales. Las surgencias producen coronas, fracturas circulares. Lo que parecen surcos, en los límites de algunas coronas, podrían ser zonas donde la corteza se introduce en el manto del planeta. El mapa del hemisferio septentrional, centrado en el polo norte, nos ofrece regiones altas y brillantes, como Maxwell y Afrodita, zonas que podrían haberse formado a medida que materia fría se iba sumergiendo en el manto del planeta, plegando en el camino la corteza suprayacente. Maxwell posee pendientes muy empinadas, fenómeno sorprendente si no nos olvidamos de las rocas calientes y deformables de la superficie del planeta.

A pesar del aluvión de datos que ha suministrado, está muy lejos la misión *Magallanes* de haber cumplido sus objetivos. Una segunda ronda cartográfica llenará las lagunas de esta primera y nos permitirá observar los cambios acontecidos en la superficie del planeta. Cuando la misión termine, allá por 1995, la sonda espacial habrá transmitido unos cuatro billones de nuevos bits de datos.



Imágenes de radar tomadas por la sonda Magallanes. Se distingue el cráter Cunitz (abajo) *y un mapa casi completo del hemisferio norte del planeta* (arriba y derecha). *Fotos: NASA/JPL.*



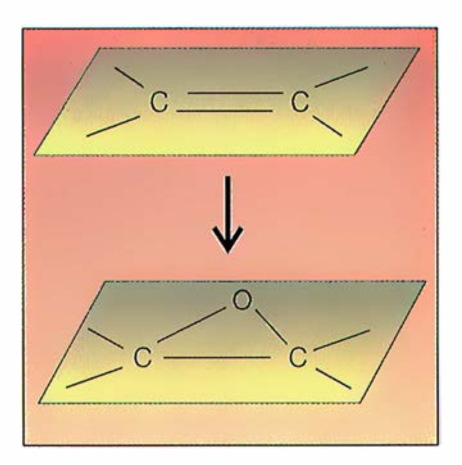


Nuevos materiales

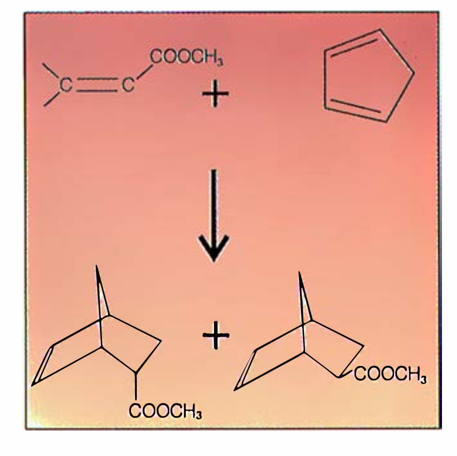
Arcillas interlaminares

Las industrias químicas y petroquímicas investigan en sólidos que presentan una gran superficie activa y poros de algunos nanómetros, que dejen paso a sólo ciertas moléculas: estos materiales sirven de adsorbente selectivo, de elemento filtrante en membranas y sobre todo de catalizador (cuando sus superficies internas son químicamente activas).

Los sólidos más conocidos que tienen poros regulares (de 0,4 a 0,8 nanómetros de diámetro) son las zeolitas, aluminosilicatos que a veces contienen otros elementos químicos. Estos "tamices moleculares" se emplean para secar gases y líquidos por adsorción selectiva del agua: en las dobles vidrieras revisten el contorno de la ventana y absorben el agua de condensación, reforzando el aislamiento térmico. Los petroquímicos utilizan también cantidades notables de tamices moleculares sintéticos (de estructura análoga a la de la faujasita, un silicato natural de aluminio, sodio y calcio) para la pirolisis catalítica (el "cracking") del petróleo: estos compuestos separan las gasolinas de los aceites pesados.



Epoxidación orientada



Reacción de Diels-Adler

Las arcillas interlaminares, nuevos materiales porosos prometedores, se crearon para obtener catalizadores dotados de poros algo mayores que las faujasitas naturales, con la mirada puesta en la descomposición de moléculas mayores que las de los aceites pesados, recuperando así el "fondo del barril". El tránsito de las faujasitas a las arcillas interlaminares ha permitido un aumento del diámetro de los poros de 0,8 a 1,8 nanómetros.

Las arcillas abundan en la naturaleza. Son silicatos, compuestos de láminas de algunas capas atómicas de espesor erizadas de grupos químicos y separadas por iones positivos, o cationes. Durante estos últimos años se ha conseguido unir progresivamente láminas hasta formar "pilares": se comienza intercambiando los cationes de arcilla por macrocationes minerales (éstos son compuestos de 13 átomos de aluminio y de grupos hidroxilo OH, que se obtienen dejando el hidróxido de aluminio en una solución que se calienta durante mucho tiempo), después se seca y se calcina el producto con el fin de unir los macrocationes a la arcilla. Los sólidos que se forman así tienen una superficie del orden de 350 metros cuadrados por gramo, y un volumen poroso de 0,2 centímetros cúbicos por gramo, estando adaptadas su acidez y su estabilidad para su uso como catalizadores.

Una de las primeras aplicaciones de las arcillas intercaladas es el intercambio de iones; por ejemplo, para la desalinización del agua de mar: desempeñan entonces la función de una membrana que deja pasar selectivamente los iones Na^+ (ya que la carga negativa de la red repele a los iones Cl^-). Otra aplicación es el llenado de columnas de separación de compuestos quirales, que son moléculas que, al igual que nuestras manos, pueden ser derecha o izquierda: cuando una mezcla de "moléculas a derechas" y de "moléculas a izquierdas" cruza una columna que contiene arcillas cuyas columnas son ellas mismas isómeras, las velocidades de transmisión son distintas; a la salida de la columna se recupera el compuesto menos retenido por la arcilla y, luego, el de quiralidad complementaria.

Las arcillas interlaminares sirven de catalizadores, aunque se ignora si se emplean en el "cracking" de los petróleos pesados, ya que la fórmula de los catalizadores industriales suele mantenerse secreta y resulta punto menos que imposible detectar una pequeña adición de arcillas interlaminares en los productos de descomposición. De lo que no cabe duda es del aprovechamiento, por los petroquímicos, de las arcillas cuando se vean obligados a rebañar el fondo del barril, es decir, cuando la diferencia de precio entre el petróleo ligero y el petróleo pesado alcance de seis a siete dólares por barril.

Las arcillas intercaladas con metales de transición, como el vanadio y el titanio, sí podrían entrar muy pronto en la catálisis de química fina. En ese dominio, las arcillas interlaminares aportan especificidad; numerosos procesos de química fina generan simultáneamente varios subproductos, pero cuando sólo es útil uno de ellos, se debe favorecer su producción por una catálisis selectiva.

Dentro de ese contexto, el equipo de B. Choudary acaba de desarrollar una reacción catalizada por arcillas intercaladas que anticipa el empleo que se podría hacer de estos productos; han efectuado una epoxidación enantioselectiva de propenol-1 sobre arcillas al titanio, en presencia de un tartrato asimétrico. En esta reacción, el doble enlace del propeno está abierto y el agua oxigenada cede un átomo de oxígeno que se puede colocar a un lado u otro de la molécula. Se trata de una reacción del mayor interés, por cuanto las epoxidaciones son reacciones corrientes en química farmacéutica. El único producto que se formaba era el agua, y el catalizador sólido se recuperaba. ¿Cómo reaccionaba el tartrato? Naturalmente se supone que queda fijado sobre las láminas, exponiendo a los reactivos de la epoxidación solamente aquellas estructuras de orientación específica, pero aún se desconoce el mecanismo exacto.

En la Escuela Superior de Química de Montpellier, hemos obtenido otro ejemplo de esta reacción: una síntesis de Diels-Alder asimétrica catalizada por arcillas, en la que reacciona una cadena de cuatro átomos de carbono, con dos dobles enlaces en los extremos, con una molécula que presenta un único doble enlace; se forma un ciclo hexagonal que contiene un doble enlace. En esta reacción, como sucede a menudo cuando los productos contienen dobles enlaces, son posibles varios productos isómeros, pero hemos descubierto que sobre una arcilla al zinc o al hierro, en una solución de tolueno, se cataliza sólo una de las reacciones (alcanzando un rendimiento del 95 por ciento, lo que es extraño en química orgánica).

Los estudios de las arcillas interlaminares apenas si tienen doce años de historia. Nos encontramos en los balbuceos de la misma. Pero se le adivina un futuro prometedor, porque buena parte de las reacciones industriales están catalizadas por ácidos líquidos, como el ácido sulfúrico o el ácido fluorhídrico; las soluciones de reac-

ción, después de la neutralización, suelen verterse a los cursos fluviales, degradando el entorno. Con las arcillas interlaminares, no se producirían esas sales nocivas. (François Figueras, de la Universidad de Montpellier.)

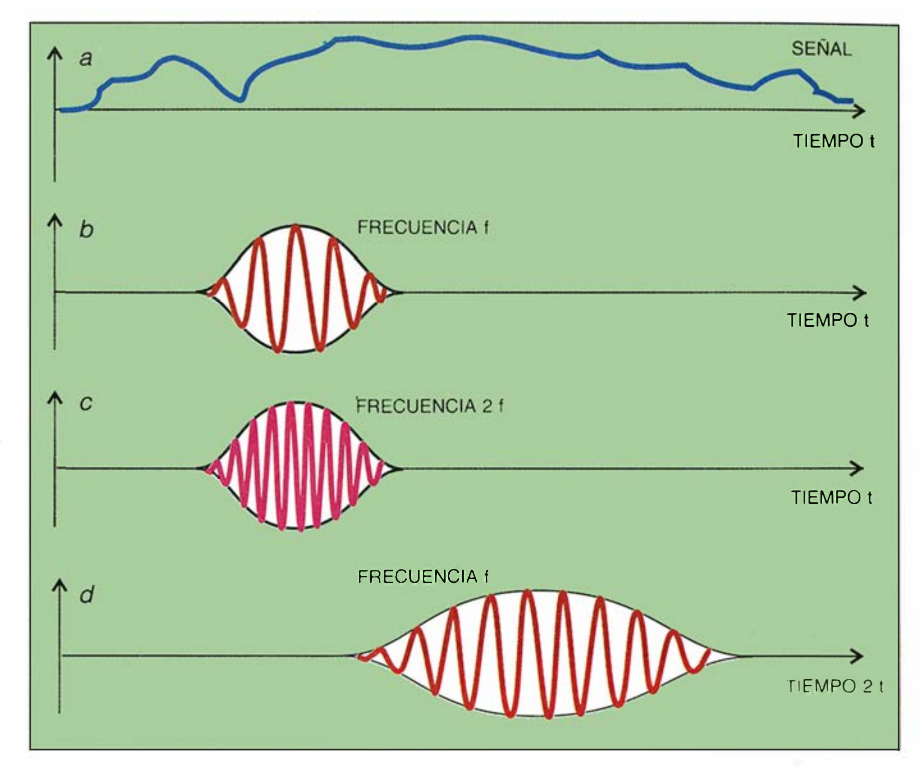
Acústica

Interioridades de los sonidos

¿Podemos descomponer los sonidos para modificar selectivamente algunos parámetros? ¿Podemos retardar la emisión sonora de una voz grabada sin alterar otras características vocales, para sincronizar el doblaje de las películas? ¿Se puede mejorar la inteligibilidad de la voz "hiperbárica" de los buzos, deformada por su propagación en un medio rico en helio? Estas transformaciones acústicas son delicadas: las frecuencias se modifican al mismo tiempo que la emisión sonora si se disminuye la velocidad de arrastre de la cinta en el magnetofón que reproduce la voz. Ahora bien, gracias a elaborados métodos de análisis y síntesis de las señales, se operan ciertas transformaciones íntimas: se descomponen los sonidos para extraer los parámetros, después se modifican selectivamente determinados parámetros y se reconstruyen los sonidos.

Los sonidos a tratar más simples son periódicos: se repiten, idénticos a sí mismos, después de un intervalo de tiempo constante, el período. La frecuencia, que determina la altura del sonido, es la inversa de este período; la intensidad sonora depende de la amplitud de la vibración acústica y el timbre depende de la forma de la onda periódica. Para analizar un sonido periódico de frecuencia f, se le descompone en una suma de funciones sinusoidales de frecuencias f, 2f, 3f....nf, de amplitudes y fases apropiadas; las componentes de frecuencias f, 2f, 3f, etc. son los armónicos, y esta sucesión constituye la serie de Fourier. Seguidamente se reconstruye el sonido sumando las sinusoides de la serie.

Pero ocurre que ni los sonidos hablados ni los sonidos musicales son estrictamente periódicos; su evolución en el tiempo determina la información vocal y la musicalidad. Una variante del método de Fourier permite el análisis de estos sonidos no periódicos, que se representan por una suma continua (la integral de Fourier) de ondas sinusoidales de todas las frecuencias posibles, asociada cada una a una amplitud y una fase determinadas. Este análisis de Fourier aún se adapta mal a los sonidos evolutivos: en él se representa un sonido finito en el tiempo mediante una suma de sinusoides que oscilan indefinidamente en el tiempo; en consecuencia, el número de sinusoides elementales debe ser infinito para reproducir los sonidos breves y los sonidos que evolucionan a lo largo del tiempo. Por último, el análisis de Fourier hace difíciles los cambios en la escala de tiempo: la evolución del sonido a lo largo del tiempo es por ello indescifrable.

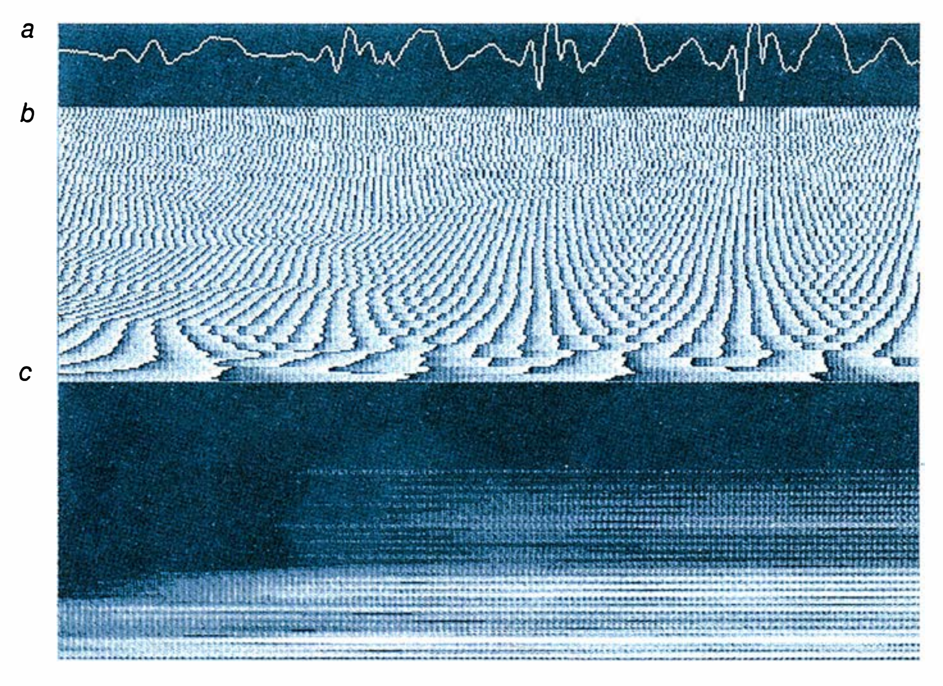


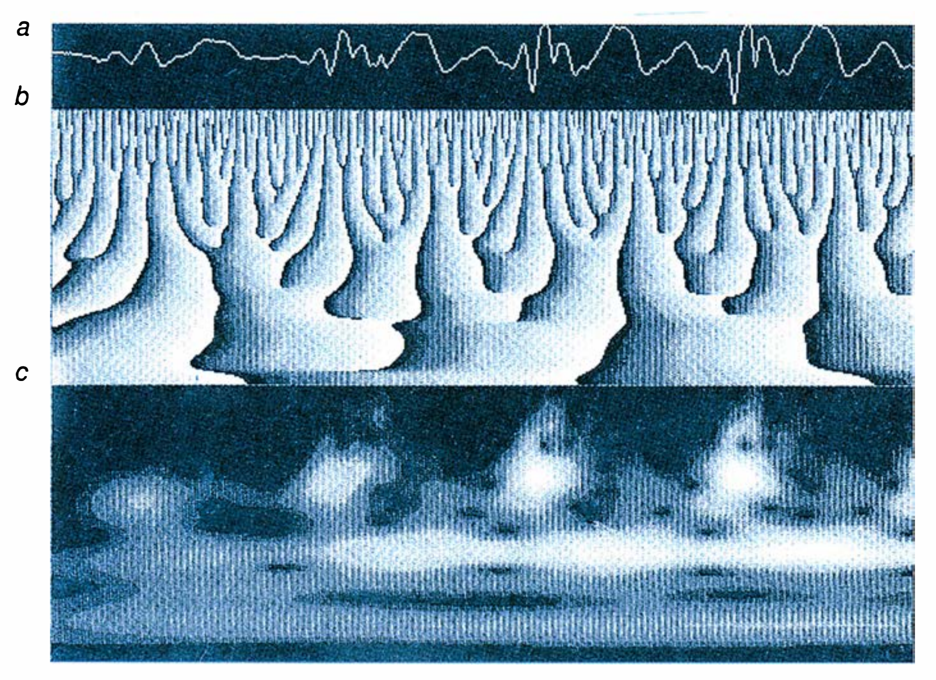
Para dejar en la mitad la velocidad de una emisión sonora (a) *sin modificar las frecuencias, se descompone primeramente esta señal en granos de Gabor (uno de los cuales se representa en b), que son sinusoides, de frecuencia determinada, envueltas por una curva gaussiana que limita su duración; a cada grano de Gabor se le asocia una intensidad y una fase. Después, se multiplica por dos la frecuencia de cada grano de Gabor* (c) *(doblando la fase asociada a ese grano). Por último, se recompone la señal ampliando al doble la escala de tiempo* (d), *lo que divide a la mitad las frecuencias multiplicadas antes por dos: la emisión de señal se retarda a la mitad, pero sus frecuencias quedan intactas.*

De ahí el permanente interés por descomponer los sonidos en segmentos temporales y analizar su evolución de un segmento a otro. Del método de Fourier arrancan el análisis de Gabor y el análisis por onditas ("ondelettes"), idóneos para el análisis y la transformación de las señales. El primero de ellos fue propuesto en los años cuarenta por Dennis Gabor (físico inglés inventor de la holografía); el segundo, avanzado hacia 1980 por Jean Morlet, geofísico francés, ha sido desarrollado por Alex Grossman, del Centro de física teórica de Marsella. Las onditas (u ondeletas si aceptamos el galicismo) han merecido la atención de los matemáticos Yves Meyer, Ingrid Daubechies y Ronald Coifman. En la unidad de informática musical dirigida por Jean-Claude Risset, del laboratorio de mecánica y acústica que el CNRS tiene en Marsella, Richard Kronland-Martinet y A. Grossman examinan las posibilidades del método de las onditas para el tratamiento de los sonidos.

Lo mismo en el método de Gabor que en el de las onditas, el sonido se descompone en funciones oscilantes de duración limitada (y no en sinusoides de duración ilimitada). Cada función oscilante elemental, denominada "grano" ("grano de Gabor" u "ondita de Morlet, respectivamente"), es una sinusoide multiplicada por una curva gaussiana que limita su duración, o zona temporal. A cada grano se le asocia una intensidad, y ésta aumenta cuando la frecuencia se aproxima a la frecuencia de la señal en el momento del análisis. Al igual que en la transformada de Fourier, la representación de las intensidades es insuficiente: asociándose también una fase a cada grano.

A continuación se puede recomponer el sonido sumando los granos ponderados con sus respectivas intensidades; los distintos granos corresponden a la vez a diferentes frecuencias y a diferentes lugares en el tiempo. Conviene proyectar la transformada del sonido sobre el plano "tiempo-frecuencia", donde el tiempo se sitúa en el eje de abscisas y la frecuencia (o su logaritmo) en el eje de ordenadas; co-





Análisis de un mismo sonido, los 20 milisegundos iniciales de un sonido de saxofón, por la transformada de Gabor (arriba) *y por la transformada en onditas de Morlet* (abajo). *La onda acústica aparece en la parte superior de las dos figuras* (a). *Debajo se representan las dos transformadas* (b *y* c) *en un plano donde el tiempo está en el eje de abscisas y la frecuencia (o su logaritmo) en el eje de ordenadas; el diagrama de las fases asociadas a los diferentes granos en función del tiempo aparece en b, y en c, el diagrama de las intensidades asociadas a estos granos en función del tiempo. El valor de las fases (módulo 2) y de las intensidades se codifica en una paleta de colores que van del negro al amarillo para valores crecientes. La escala de frecuencias es lineal para la transformada de Gabor y logarítmica para la transformada en onditas; extendiéndose en ambos casos entre 133 y 8503 hertz. En el diagrama de las intensidades* (c) *se ve que el análisis de Gabor separa las componentes armónicas, mientras que el análisis en onditas no realiza esta separación nada más que para bajas frecuencias. En las frecuencias superiores, el análisis en onditas reagrupa los armónicos, y en las frecuencias más altas pone de manifiesto la periodicidad temporal. Se percibe intuitivamente que es más sencillo ampliar la escala de tiempo sin modificar las frecuencias a partir del análisis de Gabor: si se amplía la escala temporal a partir del análisis en onditas, se alarga simultáneamente la periodicidad.*

dificándose la intensidad y la fase asociadas a cada grano en colores, matices grises o curvas de nivel. Esta representación se parece a la de una partitura musical, que indica a la vez la duración y la altura de cada nota.

Sin embargo, la representación del sonido difiere de un método a otro. En el análisis de Gabor la escala de frecuencias es lineal, en el análisis por onditas es logarítmica (lo que está más de acuerdo con nuestra audición, ya que el oído reacciona con el logaritmo de la frecuencia). La duración de las zonas temporales de análisis es constante para los granos de Gabor; en el caso de las onditas depende de la frecuencia local de la señal. En los granos de Gabor, las frecuencias locales de la señal corresponden a frecuencias de las oscilaciones elementales; en las onditas son función de la longitud de las zonas temporales: las diferentes frecuencias están representadas en ellas por la misma función oscilatoria elemental, que se dilata o contrae en el tiempo para frecuencias bajas o altas. Las onditas presentan, pues, dos ventajas con respecto a los granos de Gabor: su zona de tiempo variable permite el análisis simultáneo de fenómenos cuyas escalas de tiempo difieren, y la contracción de las oscilaciones para altas frecuencias permite una reconstrucción de la señal más estable (se minimizan las oscilaciones parásitas que aparecen al recomponer el sonido, que constituyen el "fenómeno de Gibbs").

No obstante, el análisis de Gabor se adapta mejor al retardo de la voz, como lo ha mostrado Daniel Arfib del equipo de J-C. Risset. El procedimiento de retardo consiste en separar los granos de Gabor en el tiempo sin modificar sus frecuencias y todo ello conservando su recubrimiento temporal y su coherencia de fase. Para lograr retardar la voz a la mitad, por ejemplo, se comienza por escoger una representación con granos de Gabor muy juntos en el tiempo con el fin de que su recubrimiento se conserve después de su separación; luego, se multiplica por dos la frecuencia en cada grano de Gabor (se multiplica por dos la fase asociada a cada grano, que aparece sobre el diagrama de fases de la transformada de Gabor). A continuación se recompone la señal ampliando al doble la escala de tiempo (como lo haría la disminución a la mitad de la velocidad de arrastre de una cinta magnética), lo que divide por dos las frecuencias multiplicadas previamente por dos: el ritmo de la voz se retarda así a la mitad conservando la frecuencia original de los armónicos o "formantes": los picos del espectro que caracterizan las vocales.

¿Por qué es más conveniente el

análisis de Gabor que el análisis por onditas en el retardo de la voz? Porque si se quiere evitar la aparición de componentes graves que convierten la voz en cavernosa, hemos de utilizar un análisis que separe los armónicos del sonido. El análisis de Gabor separa todos los armónicos del sonido mediante una escala de frecuencia lineal, pero ése no es el caso del análisis por onditas cuya anchura de banda es proporcional a la frecuencia: una misma ondita analizadora capta varios armónicos a la vez para frecuencias altas y éstos interfieren.

La aparición de las interferencias obedece al uso de una transformación no lineal, para dar la impresión de un retardo sin transposición de frecuencias; significa ello que sólo se retardan las evoluciones lentas que corresponden a frecuencias "sub-audio" (inferiores a 20 hertz) y que se perciben por el oído como modulaciones temporales del sonido, y se dejan intactas las frecuencias audibles (comprendidas aproximadamente entre 20 y 20.000 hertz); para ello se fija la longitud de la zona temporal de los granos de Gabor a un valor próximo a un veinteavo de segundo (lo que corresponde a 20 hertz). En esta transformación no lineal los armónicos décimo y undécimo (respectivamente 10f y 11f), por ejemplo, que se captan en la misma ondita de Morlet, se superponen para producir una "agitación" de frecuencia de 11f-10f, que es igual al primer armónico f, frecuencia que se divide a continuación por el factor de retardo (como en las modulaciones lentas) y se percibe entonces una frecuencia muy grave (voz de ultratumba). Por contra, separando cada armónico, el análisis de Gabor evita este efecto cavernoso.

Las onditas se adaptan mejor a los análisis o a las transformaciones acústicas que necesitan una escala logarítmica. R. Kronland-Martinet ha mostrado que el análisis por onditas facilita la identificación en un contexto musical, de un intervalo musical determinado (por ejemplo, de una quinta musical, correspondiente a un relación de frecuencia igual a 3/2): para ello se utiliza una ondita constituida por dos sinusoides envueltas por una curva campaniforme y cuya relación de frecuencias corresponde a este intervalo musical. Por otra parte Frédéric Boyer ha producido efectos acústicos extraños analizando la voz con onditas separadas un doceavo de octava (un semitono cromático), recomponiendo posteriormente la voz mediante la suma de las onditas separadas cuatro y siete semitonos cromáticos (lo que corresponde a un acorde perfecto mayor): se percibe entonces un sonido asombroso de cuerdas vocales que conformarían un acorde en vez de una sola frecuencia fundamental.

Arquitectura neuronal

Andamios para un cerebro en formación

Como si de un proyecto arquitectónico de altos vueltos se tratara, el desarrollo del cerebro necesita unos andamios mientras se está levantando su construcción. Lo mismo que tinglados y jaulas, el andamio del cerebro se desmantela cumplida su misión. Esa es, por lo menos, la opinión dominante y como tal se presentó en un congreso reciente neurocencias.

Propio del proceso de desarrollo es la provisionalidad de ciertas estructuras; como se dice en el sector, lo que hoy se ve, mañana habrá desaparecido. Pero ocurre que ciertos defectos de nacimiento (parálisis cerebral, por ejemplo) podrían arrancar justamente de esa textura transitoria. No podemos basar nuestros conocimientos, comienza a oírse, en el cerebro del adulto, que difiere mucho de sus primeros estadios de formación.

La identificación de ese andamio ayudaría a explicar la forma en que las conexiones de ciertas neuronas alcanzan su destino final, antes de que éste exista; por citar una muestra: durante el desarrollo, las fibras de nervios largos que transportan mensajes desde la retina deben llegar hasta el tálamo óptico, a partir de cuya región los axones talámicos se desarrollan para trabar conexiones con otras neuronas de la cuarta capa de la corteza. Pero, siguiendo con la imagen del edificio, los axones llegan hasta la capa cortical antes de que la casa esté techada.

Hace unos años, el equipo de Carla J. Shatz, de la Universidad de Stanford, descubrió un grupo de células de vida corta que servían de efectores intermedios y guías de orientación para los axones aferentes. Estas neuronas de subplaca aparecen por debajo mismo del córtex visual y encarrilan los axones talámicos, así parece, hacia su destino final.

Conocida desde hacía tiempo la existencia de las neuronas de subplaca, se las suponía meras reliquias evolutivas —como los huesos de la rabadilla en el tramo final del espinazo— o una estación intermedia de espera, hasta que los trabajos de Shatz con gatos realzaron su papel. Cuando Shatz eliminó las neuronas de subplaca en una etapa inicial del desarrollo, los axones talámicos vagaban errantes por debajo de la placa cortical.

En otro experimento más reciente, Shatz extirpó las neuronas de la subcapa en una etapa posterior del desarrollo. Los gatos, descubrió ahora, no desarrollaron las columnas de dominancia ocular, una estructura de ajuste fino del córtex visual cuya organización está relacionada con la respuesta correcta a los estímulos procedentes del ojo izquierdo o del ojo derecho. Mientras que cierta dominancia depende de los estímulos visuales de entrada, el cerebro no dispone de ningún otro medio para organizarlos que las neuronas de la subcapa. Prosiguiendo en nuestra metáfora, prescindiendo de las esas neuronas en una etapa precoz, los axones no hallarán la ciudad correcta; extirpadas avanzado algo el desarrollo, los axones no encuentran las direcciones correctas.

Los neurólogos dedicados al estudio del desarrollo del cerebro suelen centrarse en el sistema visual. Shatz sostiene, sin embargo, que las neuronas de la subcapa desempeñan el mismo papel de organización en otras zonas del córtex. Las neuronas de la subcapa parecen fraguar las primeras conexiones entre el córtex y las zonas subcorticales en una fase adelantada del desarrollo, cuando las distancias a recorrer son pequeñas.

En un desarrollo normal, las neuronas de la subcapa desaparecen una vez que los axones subcorticales alcanzan los destinos correctos. La región en la que residen estas neuronas se convierte en materia blanca, que, en una fase posterior del desarrollo, servirá de camino o vía para los axones aferentes y eferentes. Poco antes de su muerte, las neuronas de la subcapa pierden sus receptores del factor de crecimiento nervioso.

La idea de estructuras provisionales en el desarrollo cerebral está asistiendo a un fecundo renacimiento. En 1972, Pasko Rakic, de la Universidad de Yale, encontró que las células radiales de la glía —células nerviosas que rodean a las neuronas y que, hasta una fecha reciente, eran consideradas meros adornos del sistema nervioso—, sirven de soporte a las neuronas cuando avanzan hacia sus lugares de residencia en el cerebro en desarrollo. Lo mismo que las neuronas de la subcapa, esta glía radial no aparece en el cerebro adulto; a mayor abundamiento, los sistemas nerviosos, más sencillos, de peces e insectos poseen también neuronas de formación precoz que establecen dichos caminos y mueren más tarde.

Ahora bien, aunque existen más ejemplos de neuronas de vertebrados que aparecen y con el desarrollo desaparecen, ninguno está tan profundamente ligado a la construcción del cerebro como las neuronas de la subcapa. Y este sí es un hallazgo de nuestros días.

Nobel de Física

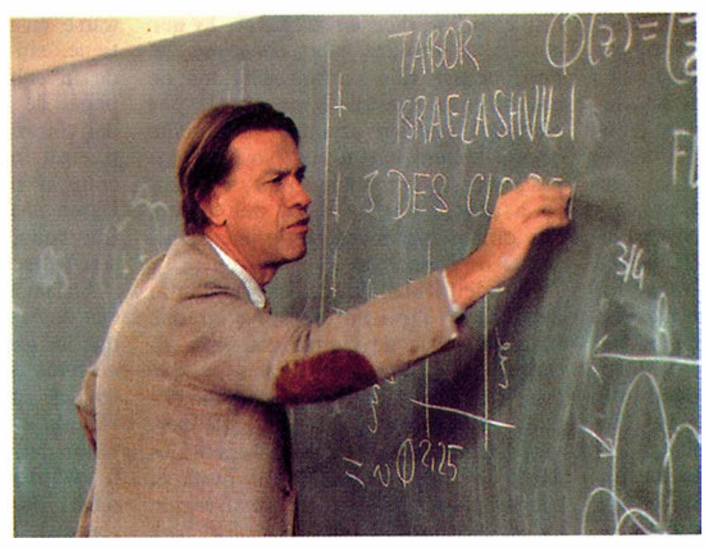
Pierre-Gilles de Gennes

Se esperaba que, de acuerdo con la costumbre de los últimos años, el Nobel de física recayera sobre un teórico o a un experimentador. Este años se lo ha llevado un naturalista.

El premio de 1991 honra a un físico de andadura original y de intereses plurales. La movilidad intelectual de Pierre-Gilles de Gennes le ha llevado a transitar desde los medios magnéticos hasta la percolación, de la superconductividad a los cristales líquidos, de los polímeros a los coloides, de los problemas de materiales heterogéneos a los problemas de adhesión y humificación; hay pocos científicos que hayan contribuido igualmente en una variedad tan grande de disciplinas. Estos pasos fructíferos por lo microscópico y lo macroscópico, por la teoría fundamental y las aplicaciones de la fisicoquímica resultan de generalizaciones brillantes y adecuadas en formas complicadas de la materia y de métodos elaborados para describir sistemas simples.

Pierre-Gilles de Gennes entró en la Escuela Normal Superior por la vía naturalista que engloba a la física, la química y las ciencias naturales: él ha evocado esta mezcla estimulante que le proporcionó el gusto y el hábito de la observación, y lamenta que la enseñanza desprecie el aprendizaje de la observación activa, clamorosamente ausente en los programas de la educación de Francia y España.

Después de la Escuela Normal, Pierre-Gilles de Gennes entra en el Comisariado para la energía atómica, donde trabaja sobre la difusión de neutrones por metales en la vecindad de las temperaturas de transición magnética. A estas temperaturas se pierde el orden magnético: este trastorno se acompaña de importantes fluctuaciones de orientación de los momentos magnéticos que difunden los neutrones. Pierre-Gilles de Gennes escoge casi solo su tema de trabajo, recupera y mejora un análisis del físico holandés Van Hove, que de todas formas no se aplica nada más que bastante lejos de los puntos críticos (la renormalización de Wilson no se había desarrollado todavía) y confecciona una decorosa tesis. "Estaba muy bien, pero no era nada del otro jueves", afirma Jacques Friedel, a quien Pierre-Gilles de Gennes presenta como uno de sus mentores. En esa época, refuerza su cooperación con sus colegas físicos, acostumbrándose a meditar su opinión sin seguir necesariamente sus consejos. En el curso de una tertulia, Anatole Abragam menciona un problema de propagación de las ondas de espines en resonancia magnética nuclear; en dos semanas, Pierre-Gilles de Gennes resuelve la cuestión, para gran satisfacción entremezclada de estupefacción de Anatole Abragam. En su estilo metafórico, Anatole Abragem, impresionado por la elevada talla de Pierre-Gilles de Gennes y sus cualidades de físico, afirma que "¡este gran majadero llegará lejos!"



Sus alumnos y colegas fotografían las pizarras escritas por P.-G. de Gennes para reflexionar en profundidad sobre sus enseñanzas.

Jacques Friedel le sugiere que aplique su trabajo de tesis a la difusión de los electrones por el magnetismo en los metales de tierras raras. Al poco tiempo, de Gennes analiza el fenómeno y obtiene las leyes de un acoplamiento magnético, entre átomos de tierras raras, que lleva su nombre: este trabajo marca el comienzo de su fama internacional.

Después de su servicio militar de 27 meses en la marina (durante la guerra de Argelia) recibe el nombramiento de profesor en Orsay. Ahí da el salto sobre la nueva teoría de los superconductores y explora con éxito el campo de las variaciones espaciales de la superconducción. Inspirado por la escuela rusa de Landau y Ginzburg, simplifica la presentación y alcanza un conocimiento casi intuitivo de los fenómenos. Funda un grupo de investigación dondese integran teóricos y experimentadores, elimina algunos modelos que constituían "arquetipos" y bloqueaban los progresos, y perfecciona modelos coherentes de la superconducción. Tiene energía para explorar hasta el límite las consecuencias de un buen modelo; sus predicciones sobre la superconductividad de superficie se verifican en el laboratorio. El grupo atraviesa momentos felices. Étienne Guyon, uno de sus colegas, alumno y amigo desde el principio, subraya su extrema generosidad al compartir las ideas: "Cuando me sucede que veo en otra parte que no existe esta generosidad tan total, eso me sorprende, me choca y me entristece". En esta dinámica de compartir se firman numerosos artículos con un nombre colectivo, el de "Grupo de superconductividad de Orsay".

De Gennes concibe las relaciones con los experimentadores de forma estereotipada: tiene una gran preocupación por los experimentos, pero no se obsesiona nunca por la inquietud de verificar sus propias versiones teóricas. El fenómeno nuevo que desborda a la teoría es bienvenido, reorientando el experimento hacia una aproximación más adaptada a la realidad de los fenómenos.

Por sugerencia suya, sus colegas examinan mediante difusión de neutrones la existencia, predicha por el físico soviético Abrikosov, de redes ordenadas de torbellinos en un material superconductor. Los primeros resultados no acaban de corroborarlo. Frente al escepticismo de Friedel destaca el optimismo de de Gennes. Meses más tarde, las redes de vórtices se confirman. Las teorías armoniosas son demasiado bonitas para que no sean verdaderas, afirma.

De Gennes desea entonces "conmutar", es decir, cambiar de tema. Se pregunta sobre la biofísica y comienza a estudiar la flexión de los polímeros, esas largas cadenas moleculares, y la transición entre el estado de hélice y el estado de bola de los polímeros. Aplica sus conocimientos de física estadística, pero no va muy lejos en esa época, pues Georges Durand regresa de los Estados Unidos con un nuevo interés por los cristales líquidos. La industria americana se interesaba por la posibilidad de gobernar las transi-

ciones de orden en los cristales líquidos con pequeñas corrientes eléctricas. El desorden inducido por el campo eléctrico hace que intervengan dimensiones del orden de la longitud de onda de la luz, por lo que parecían posibles las aplicaciones para la representación visual.

Pierre-Gilles de Gennes muestra que las ecuaciones que hay que resolver para estudiar las variaciones espaciales del orden de los cristales líquidos recuerdan a las que ha estudiado en magnetismo y superconductividad. Inmediatamente se encuentra a la cabeza del tema, e incluso con adelanto sobre la escuela americana, que es más experimental. En los cristales líquidos estudia las transiciones entre las fases, los defectos, las fluctuaciones de orden, las recolocaciones bajo el efecto de presiones externas, y anima a los experimentadores a que se interesen por las fluctuaciones y las inestabilidades hidrodinámicas observables por difusión de la luz. Algunos experimentadores cercanos a P.-G. de Gennes, Étienne Guyon, Albert Libchaber y Pierre Bergé, ponen a punto métodos finos de observación, especialmente ópticos, y desarrollan hipótesis que se mostrarán fecundos en otros campos de la física. El libro sobre los cristales líquidos de Pierre-Gilles de Gennes es, como de costumbre, un gran clásico: su capacidad para exponer con sencillez y acotar lo esencial queda patente en sus conferencias y sus libros. Más que un talento adicional, esta aptitud para difundir las buenas ideas es una característica de su personalidad. Pero tiene clavada una espina. Confiando en ese dinámico grupo de físicos de punta, la industria habría podido sacar partido de los avances franceses teóricos y prácticos en ese campo.

El campo de los cristales líquidos no se ha agotado. Sin embargo, él desea volver a sus estudios sobre los polímeros. Funda un nuevo grupo de estudio (el tercero después del de la superconductividad y el de los cristales líquidos) y dilucida la dinámica de las cadenas poliméricas, en colaboración con el físico inglés Sam Edwards; demuestra cómo se desplaza reptando una cadena polimérica, es decir, se desliza sin alterar apenas su forma, en el encadenamiento que constituye el conjunto de sus vecinos.

De Gennes estudia luego la cinética de la humificación y orienta sus investigaciones hacia una físiquímica más aplicada, quizá porque su puesto de director de la Escuela de Física y Química de París le acerca más a los problemas planteados por ingenieros e industriales.

La voluntad de Pierre-Gilles de Gennes se ha mantenido inconmovible: dilucidad las leyes de la naturaleza tal como ésta se presenta, transformando la lección de las cosas en una ciencia formalizada. El formalismo de la mecánica cuántica y su alejamiento de la comprensión del mundo perceptible había hecho olvidar a veces que la finalidad de la física es explicar los fenómenos naturales, el comportamiento del mundo y de la materia. Salido él mismo de los trabajos de mecánica cuántica microscópica, Pierre-Gilles de Gennes es uno de los más fervientes defensores de la física macroscópica.

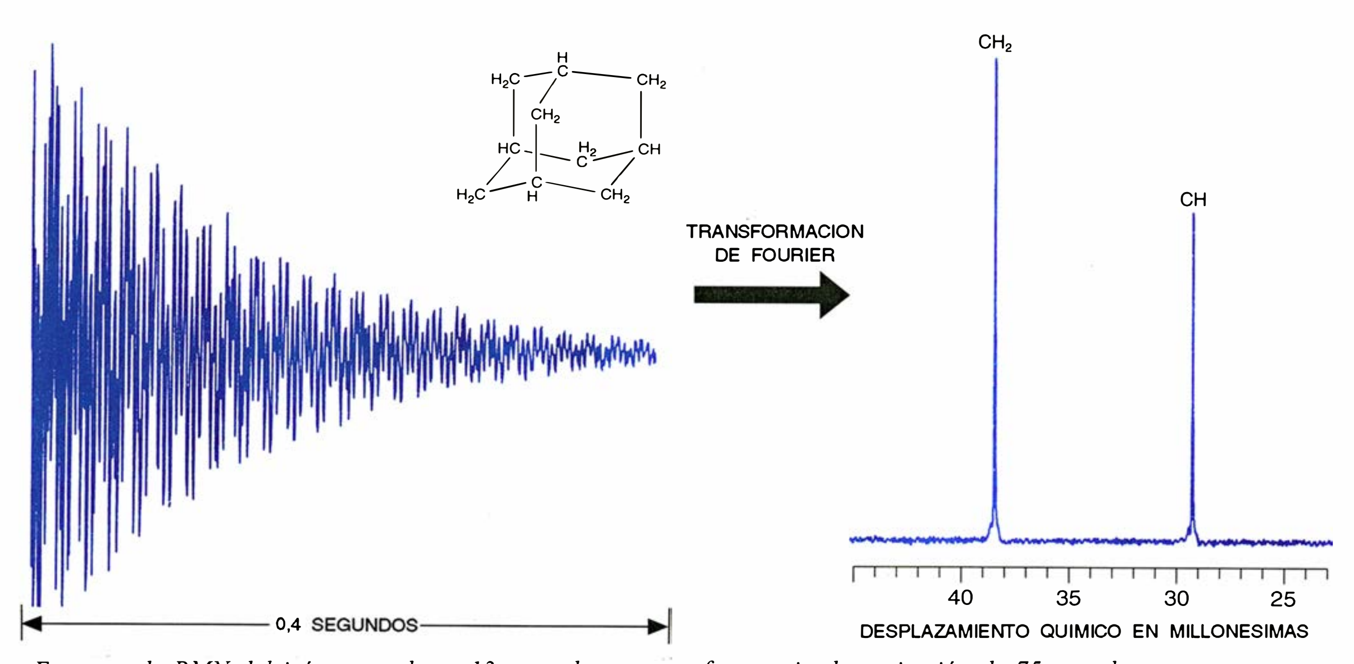
Nobel de Química

Generalización de la resonancia magnética nuclear

También el Nobel de química se quedó en Europa, concedido a Richard Ernst, del Instituto Federal Politécnico de Zürich, por sus trabajos, dos en particular, de espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN), gracias a los cuales esa técnica entró en el armamentario común de químicos, físicos y biólogos.

No es la primera vez que recae el Nobel en esa técnica. En 1952 sus descubridores del año 1945, Felix Bloch y Edward Purcell, recibieron el de física. Bloch, por capricho de la historia, era también suizo y había estudiado en el Politécnico tigurino, y por formación pertenecía a la primera hornada de discípulos de los padres de la física contemporánea: Weyl, Schroedinger, Heisenberg, Bohr y Fermi. Y Pauli. En efecto, Bloch y Purcell se habían inspirado en un escrito, mediados los años veinte, de Pauli, donde exponía que la estructura hiperfina de las líneas espectrales debíase al hecho siguiente: los núcleos atómicos poseen momento angular intrínseco (espín) que es paralelo a su momento magnético.

En sus comienzos, y por largo tiempo, la RMN se aplicó al barrido de las radiofrecuencias variables de una muestra química sometida a un campo magnético. A determinadas frecuencias, los espines de los núcleos atómicos se reorientan con respecto a dicho campo, lo que induce una señal eléctrica



Espectro de RMN del isótopo carbono-13, tomado con una frecuencia de excitación de 75 megahertz en un campo magnético de 7,05 tesla.

en los detectores de un espectrómetro RMN. Las frecuencias de resonancia variaban, pues, acordes con el entorno químico. Pero la sensibilidad de los aparatos era muy limitada, y sólo se mostraban seguros con determinados núcleos (hidrógeno, flúor y fósforo).

Hasta que en la década de los sesenta Ernst modificó la técnica introduciendo radiopulsos intensos. Proceso que redondeó mediante la aplicación de una herramienta matemática poderosa: la transformación de Fourier. (El lector de *Investigación y Ciencia* recordará las virtualidades de ese útil de análisis matemático expuestas en un espléndido estudio de agosto de 1989.) El trabajo de Ernst, firmado con su colega William A. Anderson, apareció en *The Review of Scientific Instruments* (37, 93, 1966). Con esas dos incorporaciones, la técnica decuplicaba su rendimiento y, con ello, ampliaba el cupo de núcleos atómicos susceptibles de investigación, destacando el de los isótopos del carbono. Se generalizaron los núcleos y las muestras en que se encerraban, incluidas las biológicas. Pero la RMN obtenía sólo espectros unidimensionales de frecuencias.

La segunda innovación de Ernst sería conseguir RMN en dos dimensiones. En esta técnica el espectro de RMN se presenta a lo largo de dos ejes de frecuencia ortogonales. En vez de usar pulsos aislados de radiofrecuencias, se ideó introducir secuencias de pulsos; en este planteamiento, las muestras se someten a pares de pulsos en estrecha sucesión que perturban el sistema de espines, variando en cada par el intervalo entre pulsos, para analizar (por Fourier) la señal resultante en función del tiempo de cada detección y en función del intervalo entre pulsos. (En una secuencia de pulsos, suele empezarse con pulsos de radiofrecuencias de 90 grados de una fase determinada para convertir la magnetización longitudinal de equilibrio en magnetización transversal.) Datos que proporcionan los espectros bidimensionales de los núcleos de una molécula. No tardó la bioquímica en sacarle partido a esta técnica RMN refinada, hasta el punto de que la actual estereoquímica de macromoléculas sería impensable sin ese medio.

Nobel de Medicina

Medición de la corriente en canales iónicos individuales

El último premio Nobel de medicina y fisiología se lo han llevado dos científicos alemanes por sus revolucionarios trabajos sobre la función de los canales iónicos de las membranas celulares: Erwin Neher, director del departamento de biofísica de membranas del Instituto Max Planck de Química Fisiológica en Göttingen, y su antiguo colaborador Bert Sakmann, que dirige en la actualidad el departamento de fisiología celular del Instituto Max Planck de Investigación Médica en Heidelberg.

Los canales iónicos de las membranas celulares forman parte de procesos esenciales en cuya virtud el hombre piensa, siente o hace. Las membranas biológicas se componen de una doble capa de fosfolípidos que actúa de aislante eléctrico, barrera que no pueden atravesar los iones disueltos en el medio acuoso. Incrustadas en la capa hay proteínas que crean poros llenos de agua. Los iones del medio interno y del medio externo de la célula pueden pasar de un lado a otro de la membrana a través de uno de esos canales. Vienen a ser, pues, estos conductos a modo de enzimas que catalizan el transporte eléctrico de iones: rebajan drásticamente la barrera energética para facilitar la difusión pasiva en las membranas biológicas.

Gracias a los canales y a las bombas de iones, las células mantienen la diferencia de potencial —factor importante para la vida— entre su medio interno y su medio externo. El potencial de reposo, de aproximadamente -40 a -70 milivolts, resulta, séanos permitida la simplificación, de la desigual distribución de las concentraciones de los distintos iones, en particular del sodio y el potasio. Constituye el fundamento para la excitación eléctrica de muchas células, de las nerviosas sobre todo.

En cuanto compuertas regulables, los canales iónicos se abren y se cierran si modificamos la diferencia de potencial de la membrana celular; por ejemplo, a raíz de la llegada de un impulso nervioso o en virtud del engarce, en las proteínas, de moléculas señalizadoras químicas (indicadores), como los neurotransmisores y otros mensajeros intracelulares y extracelulares. Los canales iónicos pueden ser activados o inhibidos, bloqueados, por fármacos o sustancias tóxicas.

En el bienio de 1949 a 1951, los fisiólogos ingleses Alan I. Hodgkin y Andrew F. Huxley, de la Universidad de Cambridge, explicaron en una serie de trabajos una nueva técnica, la pinza de potencial, que permitía investigar, aparte, los canales de sodio y potasio en las fibras nerviosas gigantes del calamar. Mediante la aplicación de microelectrodos y la reacción de acoplamiento "se pinzaba", en cierto modo, el potencial de membrana; es decir, se mantenía artificialmente en un valor predeterminado por la corriente eléctrica opuesta al flujo de iones. Esa corriente confinada, encargada de mantener el equilibrio exacto del flujo iónico desencadenado, servía de medida de las corrientes iónicas de la membrana.

Esos trabajos, premiados en 1963 con el Nobel, suministraron la primera prueba convincente de la existencia real de esclusas distintas, para el sodio y para el potasio, en la membrana celular. Con su técnica de medición, Hodgkin y Huxley sólo pudieron registrar la corriente total que cruzaba a través de esos canales iónicos; no podían, pues, pronunciarse sobre el comportamiento individual de cada canal. Hubo que esperar veinte años para recabar, mediante métodos estadísticos, alguna información aproximada, extraída del ruido de fondo, del comportamiento de cada canal por separado. El análisis de ese murmullo o irregularidad arranca, sin embargo, de unas premisas cuya validez no aparece siempre clara.

Pinzamiento zonal de membrana

En el año 1976, el físico Neher y el médico Sakmann, que entonces trabajaban juntos en el Instituto Max Planck de Göttingen, publicaron un artículo en Nature donde daban a conocer un método que permitía medir corrientes pequeñísimas, de escasos picoampères (billonésimas de ampère), las corrientes que fluyen por los canales iónicos. Se presiona un finísimo capilar de vidrio, cuya punta mide un micrometro de diámetro; el borde del capilar aísla eléctricamente la zona mínima de membrana que abarca de la solución en la que se encuentra. En el caso ideal, la zona afectada encierra un solo canal; ahora bien, aun cuando hubiera más, se pueden medir las corrientes individuales de cada conducto al no hallarse sincronizada su actividad.

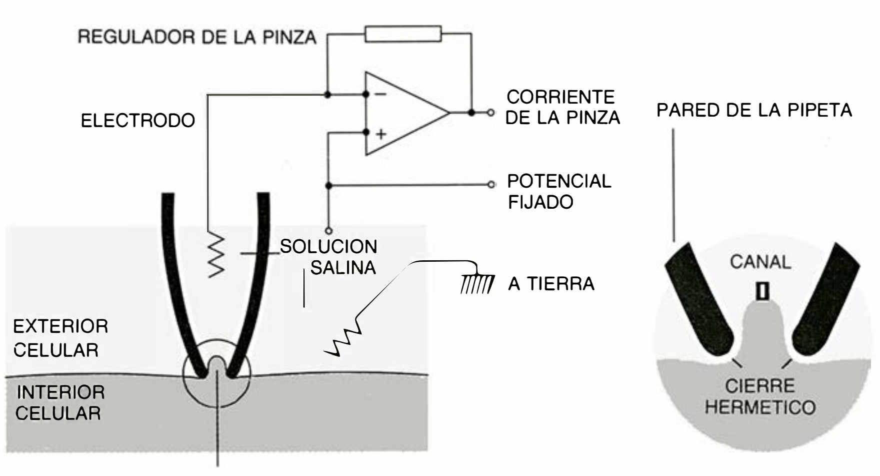
Esta técnica, conocida en inglés por "patch clamp" y pinzamiento zonal en castellano, ha revolucionado la fisiología celular. Se pretende ya generalizarla al dominio molecular. El método reviste especial interés en biología, y en él se cifra la esperanza de los físicos experimentalistas de ver directamente partículas atómicas.

Poner en práctica esa idea, genial, sencilla y elegante, precisó, no obstante, de algunos trucos que facilitaran la separación de los sucesos eléctricos individuales de cada canal por separado. Así, la punta del capilar debe pulirse a fuego con un alambre al rojo para

alisarla; mediante tratamiento enzimático, se ha de procurar que la superficie de la membrana de la célula quede limpia de moléculas indeseables. Se reveló como decisivo el crear un vacío en el interior de la pipeta. La zona de la membrana cubierta por la abertura en vacío se ve succionada y se adhiere con fuerza a la superficie del cristal, lo que reduce de forma notable corrientes solapadoras, lo que a su vez elimina el ruido de fondo en favor de las señales de interés.

A principios de los ochenta se consiguió desarrollar este método con diversas variantes. En esa línea, el contacto en la zona de membrana se hizo tan firme, que posibilitó incluso la separación, del resto de la cubierta celular, de dicha región con la pipeta, lo que dejó el campo libre para poder trabajar por los lados de la membrana e investigar mucho mejor la acción de toxinas, fármacos, inhibidores de canal y iones sobre la conductividad y el comportamiento eléctrico de los canales. También se pudo perforar, mecánica o eléctricamente, la zona succionada de membrana para diálisis ulteriores del interior celular con el auxilio de la solución de la pipeta. Tal vaciamiento resulta especialmente apropiado para introducir sustancias en la célula viva y estudiar in situ su acción.

Con el recurso a la técnica de pinzamiento zonal se puede seguir, además, el curso de las hormonas y los neurotransmisores segregados por la célula. Esos metabolitos se hallan almacenados en vacuolas o sáculos del citoplasma. Tras la excitación química o física de la célula, las vacuolas se funden con la membrana citoplasmática y vierten su contenido al exterior. Dicha fusión dilata el área de la membrana y aumenta, por consiguiente, su capacidad eléctrica. Ello permite medir sucesos de fusión individuales e investigar de esa forma el mecanismo implicado en el proceso celular en cuestión.



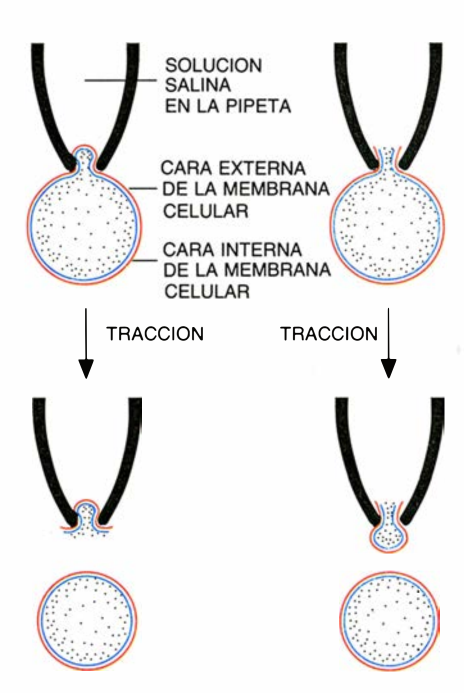
Esquema de la técnica del pinzamiento zonal de membrana. La punta del capilar, finísima y esmeradamente pulida, succiona con tal fuerza —por la creación de un vacío ante la membrana— que queda eléctricamente aislado del entorno el canal iónico presente en esa zona de la membrana. El regulador de la pinza mantiene, en un valor fijado, la diferencia de potencial gracias a un circuito de regulación. El valor de la corriente eléctrica precisa para mantener el equilibrio, con el que se compensa el flujo de iones a través del canal, constituye una medida de la corriente de iones.

Mutantes artificiales y quimeras

En relación con los métodos de la biología molecular, el procedimiento bioquímico desarrollado por Neher y Sakmann en Göttingen ha supuesto un salto cualitativo en nuestro conocimiento del transporte de iones a través de biomembranas. Se han identificado ya un número elevado de canales iónicos regulados de distinta forma, que varían notablemente su selectividad para determinados iones, y cada vez se van encontrando más componentes o miembros de esta familia de proteínas. Así, se sabe que prácticamente todos los tipos de células del organismo poseen una dotación característica de canales iónicos.

Además, se han podido aislar algunos genes que determinan canales iónicos. Sakmann y otros investigadores han insertado esos genes en estadios precoces, fácilmente accesibles, de ovocitos de anfibios, que sintetizaron la proteína correspondiente y la integraron correctamente en la nueva membrana celular, donde se analizaron con la técnica del pinzamiento zonal. Gracias a los genes introducidos en esas "células nodrizas", se puede crear artificialmente poros a partir de las subunidades proteicas de los distintos canales, es decir, quimeras, así como alterar partes de las subunidades para sacar a la luz pormenores de su modo de operación. ¿Cómo puede distinguir un canal entre un ion de potasio y un ion de calcio? ¿En qué lugar de la cadena proteica se anclan las sustancias que abren la compuerta? ¿De qué manera influyen los antagonistas y los inhibidores que suelen mostrar una acción farmacológica beneficiosa en las propiedades de los canales?

La respuesta a ese rosario de preguntas fundamentales habrá de servir sobre todo en medicina, pero no carece de importancia en otros dominios: desarrollo de pesticidas (piénsese, por ejemplo, en un veneno para atacar el proceder normal de un insecto dañino). Abundan las enfermedades que tienen su origen en los defectos genéticos de los canales iónicos. Por citar una, hay indicios de que el transporte de los iones cloruro a través de su canal específico se ve alterado en la mucoviscidosis, enfermedad hereditaria de desenlace fatal, cuyo nombre obedece a la mucosidad viscosa que dificulta la respiración; ocurre también lo propio en determinadas enfermedades de los músculos. La técnica de pinzamiento



Variantes de la técnica de pinzamiento zonal de membrana. A la izquierda, disposición original para estudiar el comportamiento del canal en situación normal. A la derecha, la conjugación de succión y punción nos posibilita la diálisis celular.

de Göttingen nos hace albergar esperanzas de poder aclarar esas enfermedades en el terreno molecular y desarrollar medicamentos precisos para su correcto tratamiento. (Ulrich Benjamin Kaupp, profesor de química biofísica en la Universidad de Colonia y director del Instituto sobre el Procesamiento de la Información del Centro de Investigación Jülich.)

Mecánica cuántica

El juego del billar electrónico

Ante un problema, lo normal es remangar la camisa, manos a la obra. Los físicos, en cambio, reaccionan de forma diferente: se ponen a jugar. Para averiguar el comportamiento de los electrones en una red de un semiconductor en ciertas condiciones, Dieter K. Weiss, del Instituto Max Planck de Física del Estado Sólido, y Michael L. Roukes, del Centro Bell de Investigación de las Comunicaciones, han creado una micropastilla ("microchip") dotada de defectos oportunamente introducidos en la red para que los electrones reboten, cual bolas ante los obstáculos de un billar electrónico.

De lo que se trata es de saber si basta la mecánica clásica o se precisa de la teoría cuántica para explicar el comportamiento de los electrones cuando se mueven con alta movilidad por un campo magnético a bajas temperaturas. En un campo magnético, los electrones se desvían en la dirección perpendicular a la del flujo de corriente. El efecto Hall, así se llama la desviación, depende de las propiedades de la corriente: voltaje y resistencia. Si se reduce el campo magnético, la resistencia Hall disminuye suavemente. Pero, si confinamos los electrones en canales angostos y de gran movilidad, se produce un fenómenos inesperado: la resistencia Hall se nivela, formando una zona plana en su representación gráfica, para decaer luego hasta valores cercanos al cero.

Creyóse en un comienzo que el fenómeno, el templado del efecto Hall, tenía que ver con la naturaleza ondulatoria del comportamiento cuántico de los electrones. Criterio que no compartían el equipo de Christopher J. B. Ford, del Centro Thomas J. Watson de IBM, ni, por su parte, C.W.J. Beenakker y H. van Houten, de los laboratorios Philips en Eindhoven, quienes demostraron que el fenómeno podía explicarse ciñéndose a cálculos de mecánica clásica, donde los electrones se suponían bolas que procedían dando bandazos por la red del semiconductor.

Dieter K. Weiss y sus colaboradores han confirmado la validez de la hipótesis clásica en la micropastilla. Para llevar a cabo la prueba han sembrado litográficamente de muescas un semiconductor, espaciadas a intervalos regulares de unos 300 nanómetros (mil millonésimas de metro), que dispersan los electrones. Aunque los semiconductores suelen tener defectos, distribuidos al azar, con los que chocan los electrones, hay muchas más hendiduras, motivo por el cual colisionan con éstas en muchísimas ocasiones más.

Según la intensidad del campo magnético, los electrones se "enganchan" en el número previsto de muescas, formando órbitas cerradas perfectamente circulares a su alrededor, o bien se limitan a colisionar con ellas y rebotar, en su trayectoria por el semiconductor. Este comportamiento clásico evidencia drásticos aumentos de la resistencia, pues el enganche de los electrones a unas zonas de la red relaja la densidad de carga que fluye por el canal. Loas medidas tomadas se ajustan a un modelo clásico simple, prueba de que los electrones obedecen en ese medio las reglas clásicas, no los esquemas de la mecánica cuántica.

Pero se acepta que se producirían efectos cuánticos genuinos si de una hendidura a otra mediaran sólo 50 nanómetros y bajáramos cien veces la temperatura. En estas circunstancias ha de predominar la naturaleza ondulatoria del electrón y provocar efectos como la creación de ondas estacionarias entre muescas y originar toda una nueva fenomenología.

Otros indicadores de los signos cuánticos podrían incluir oscilaciones de muy pequeña escala e irregularidades en las medidas de la resistencia. Téngase presente, no obstante, que el movimiento será ahí muy complejo y con toda seguridad caótico, por lo que no será fácil resolver los modelos mecánico-cuánticos.

Aunque el diseño del juego se limita al ámbito de la física fundamental, podemos imaginarnos algunas aplicaciones prácticas, verbigracia, en detectores de alta sensibilidad; en efecto, un circuito con un semiconductor de muescas puede ser más sensible que los circuitos de semiconductores al uso, por cuanto la distribución densa de hendiduras suprimiría la dispersión causada por los fonones, o por las vibraciones de la red del cristal. Menor difusión significa mayor movilidad electrónica y, en consecuencia, la capacidad de disponer de circuitos más eficientes a temperatura ambiente.

Inmunología vírica

Los anticuerpos destruyen algunos virus en el interior de las neuronas

Desde hace décadas, los inmunólogos saben que las proteínas móviles conocidas con el nombre de anticuerpos luchan contra las infecciones bloqueando de forma selectiva las sustancias extrañas presentes en el torrente sanguíneo. Así destruyen los virus antes de que éstos invadan las células. Los que coseguían penetrar en las células, suponíase, podían cnsiderarse a salvo, al menos de los anticuerpos.

Sin embargo, todo indica que los anticuerpos constituyen una defensa mucho más tenaz. Neurobiólogos de la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins han puesto de manifiesto la capacidad de los anticuerpos para eliminar virus que se estaban desarrollando en el interior de las neuronas. Este mecanismo inmunitario parece proteger al sistema nervioso y actúa presumiblemente en otros tejidos también.

Los métodos empleados por el sistema inmune para librar al cuerpo de los tejidos infectados son tan eficaces cuan brutales. Los linfocitos *T* actúan sobre las células infectadas y las eliminan con la ayuda de enzimas destructivas. Los tejidos que las rodean reparan el daño producido y reponen las células perdidas.

Esta estrategia inmunitaria no funciona en el sistema nervioso. Las neuronas adultas de los mamíferos no suelen dividirse; por consiguiente, si las células *T* exterminaran a las neuronas enfermas, tendríamos el cerebro y la médula espinal como un colador, llenos de agujeros permanentes.

Para investigar de qué modo hacen frente las neuronas a la acción de los virus, Diane E. Griffin y su equipo infectaron una cepa de ratones que carecían de sistema inmune con un virus que se multiplica en las células nerviosas. Los ratones que no recibieron ningún tratamiento posterior se mantuvieron infectados a lo largo de todo el experimento. Pero otros recibieron anticuerpos procedentes de animales normales expuestos al mismo virus. Con este suero en sus sistemas, los ratones limpiaron de virus su tejido nervioso en un plazo de 48 horas. (Los que habían sido inyectados con células *T*, en vez de anticuerpos, no mostraron ninguna mejora.)

El equipo de Griffin llegó a la conclusión de que los anticuerpos inyectados habían eliminado, por derecho, los virus de las neuronas. Los anticuerpos se oponía a la transcripción o la tra-

ducción de genes víricos, es decir, bloqueaban la secuencia de etapas de la replicación cuando las células sintetizan proteínas víricas.

Beth Levine, miembro del grupo de la Johns Hopkins, ofrece dos explicaciones alternativas sobre la forma en que los anticuerpos eliminan los virus. Una posibilidad sería que los anticuerpos entraran en el soma de las neuronas y comenzaran a actuar con los componentes víricos en replicación. Algunos estudios han demostrado que las neuronas pueden admitir anticuerpos cerca de sus sinapsis, aunque nadie sabe si tal absorción sirve para algo. La otra posibilidad sería que los anticuerpos se enlazaran con las partículas víricas en la superficie de las neuronas e instaran la producción de algunos cambios en la célula que suspendieran la replicación del virus.

A la espera de la resolución del dilema, se ha demostrado que los tratamientos experimentales con anticuerpos resultan positivos contra algunas infecciones neurológicas. Se supone que estos tratamientos actúan refrenando la propagación extracelular de los virus. Se habla también de que los sueros podrían detener el crecimiento de los virus en las neuronas. De cualquier modo, los anticuerpos no constituyen para las neuronas un arma de defensa antivírica perfecta. Las infecciones neuronales crónicas, pensemos en las que originan el herpes, persisten incluso en individuos dotados de un sistema inmune funcional.

Entomología médica

Mosquitos útiles en la lucha biológica sirven para aislar virus

Los ingleses son flemáticos, los italianos volubles, los alemanes disciplinados, los franceses frívolos... y los mosquitos son insectos que chupan sangre. Tiranía y pobreza de las generalizaciones: algunos mosquitos del género *Toxorhynchites* no pican, no son vectores de enfermedades y poseen larvas que devoran a otros mosquitos perjudiciales. ¿Podrían luchar contra los mosquitos vulnerios que transmiten el paludismo, la fiebre amarilla, el dengue, las encefalitis víricas? Marie Vazeille-Falcoz, del Instituto Pasteur, llama la atención sobre la paradoja que supone que tales mosquitos se empleen menos en la lucha biológica que en investigación básica de las enfermedades víricas (el dengue, por ejemplo).

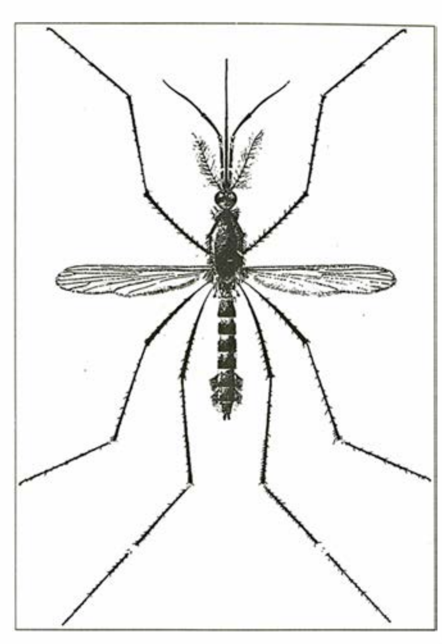
Estos mosquitos depredadores de otros mosquitos dejan la puesta en el agua retenida en ciertas cavidades vegetales (huecos de árboles, urnas de plantas carnívoras, base de hojas acanaladas, etc.), receptáculos que buscan otros mosquitos, como los *Aedes*, portadores de filarias (los parásitos responsables de la filariasis) o de arbovirus (que son los agentes de la fiebre amarilla, del dengue, de encefalitis, etc.) Recubiertos de escamas de reflejos metálicos verdes, plateados o purpúreos, de talla grande, los dos sexos de *Toxorhynchites* se alimentan de néctar, nunca de sangre.

En la época del apareamiento, los machos forman grupos numerosos sobre hojas y arbustos; las hembras fecundadas ponen unos 400 huevos, de preferencia por la tarde, en el curso de un vuelo elipsoidal durante el que abandonan sus huevos de uno en uno, sin posarse, en la superficie del agua. La duración del desarrollo del huevo al adulto, variable en función de las especies y de las condiciones climáticas, es, en el caso de *Toxorhynchites amboinensis*, de unos treinta días. Una larva consume hasta 200 larvas de mosquito a lo largo de su desarrollo, y se dedica al canibalismo cuando las presas habituales son raras y el medio exiguo. En cambio, parece ser que cuando el alimento es abundante las larvas poco antes de la ninfosis matan a sus presas sin siquiera consumirlas. La longevidad media de los adultos es del orden de un mes.

Desde los años veinte de nuestro siglo se viene pensando en adaptar los *Toxorhynchites* para la lucha biológica. Se introdujo una especie en las islas Hawai en 1929, después otra en las Fiji en 1931. Se soltaron más tarde otras especies en esas islas y en los archipiélagos del Pacífico (islas Samoa). Una sola especie, *Toxorhynchites amboinensis*, se ha asentado bien en las islas Hawai, Samoa y de la Sociedad, pero entre depredadores (las larvas de *Toxorhynchites*) y presas (*Aedes*) se ha instaurado un nuevo equilibrio. Por desgracia, las epidemias debidas a los mosquitos vectores de enfermedades han persistido.

La mejor solución para yugular los mosquitos vectores parece ser la de realizar sueltas "de inundación", pero ello requeriría criar a *Toxorhynchites amboinensis* en masa, hasta ocupar todos los lugares larvarios de *Aedes*. Las intervenciones más eficaces son las que utilizan larvas en su tercer estadio. Aunque el transporte de los adultos resulte más difícil, se obtienen igualmente resultados positivos con hembras grávidas, que colonizan con más facilidad las guaridas inaccesibles o de difícil localización.

Si los *Toxorhynchites* no son las armas biológicas que se soñaba, sirven sin embargo para aislar arbovirus. En el caso del dengue (una enfermedad debida a un arbovirus y caracterizada por fiebres y encefalitis), se inocula en el tórax de un *Toxorhynchites* el virus responsable de la enfermedad (aislado de la sangre de enfermos o de mosquitos recolectados en las zonas contaminadas), y después se buscan los antígenos víricos por inmunofluorescencia indirecta. La replicación vírica se efectúa entonces en el insecto, que sirve de amplificador.



Un mosquito del género Toxorhynchites, *a partir del cual se aíslan arbovirus.*

Los *Toxorhynchites* tienen la ventaja sobre los *Aedes* de ser mayores, más resistentes y de no presentar, después de la inyección, riesgo alguno para los manipuladores: no son hematófagos. Finalmente, esta técnica, que puede practicarse en todas partes, es más económica que los métodos que implican mantener cultivos celulares o criar ratones.

Fecundación

Seguimiento no lesivo del curso de los espermatozoides por el tracto genital

Por primera vez se ha logrado marcar radiactivamente espermatozoides vivos sin dañar su integridad, gracias a lo cual podemos investigar el curso que siguen en su ascensión por el tracto genital femenino, sin recurrir a ninguna otra manipulación. A la larga, tal camino podría conducirnos a descubrir las claves desconocidas de ciertas formas de esterilidad.

Un aspecto de la concepción, probablemente decisivo, si bien estudiado hasta ahora de forma tangencial es el relativo al comportamiento de los espermatozoides durante su recorrido por el tracto genital de la hembra. A diferencia de lo que sucede con la bioquímica de la fecundación, no hace falta limitarse ya a los experimentos en el tubo de ensayo, sino que podemos operar directamente en el organismo femenino.

En la mayoría de los estudios realizados hasta el presente, se sacrificaron animales cierto tiempo después del apareamiento y se recuperaban de ese modo los espermatozoides de los distintos cortes del tracto genital. Semejante proceder, aunque útil, no ha reportado ningún hallazgo espectacular, arrastrando, por contra, graves inconvenientes y molestias; piénsese que con la muerte del animal y la consiguiente extracción de los espermatozoides se subvierte la distribución de éstos, hasta el punto de que las zonas de gran densidad de los mismos aparecen ralas. Y debido a que sólo cabe una sola medida por animal, los datos de la bibliografía disponible se manifiestan muy a menudo dispares, si no contradictorios.

Nosotros hemos creado un método nuevo que nos permite orillar todos esos problemas. Mediante el recurso a una sustancia radiactiva (HMPAO), que lleva incorporada Tc-99m, isótopo radiactivo del tecnecio, hemos marcado espermatozoides de manera estable e inocua, en el sentido de que ni morían ni se mermaba su movilidad. En experimentos realizados con conejos se siguió, con fiel exactitud, el movimiento de los espermatozoides a lo largo del tracto con un detector de radiaciones gamma de alta energía, radiación que no sufre alteraciones por parte del tejido animal.

Los diferentes cortes del tracto genital pudieron concatenarse con absoluta diafanidad. Además, el marcaje es independiente de la calidad del espermatozoide, razón por la cual podemos contar con suficiente exactitud el número cabal de espermatozoides midiendo la intensidad de la radiactividad.

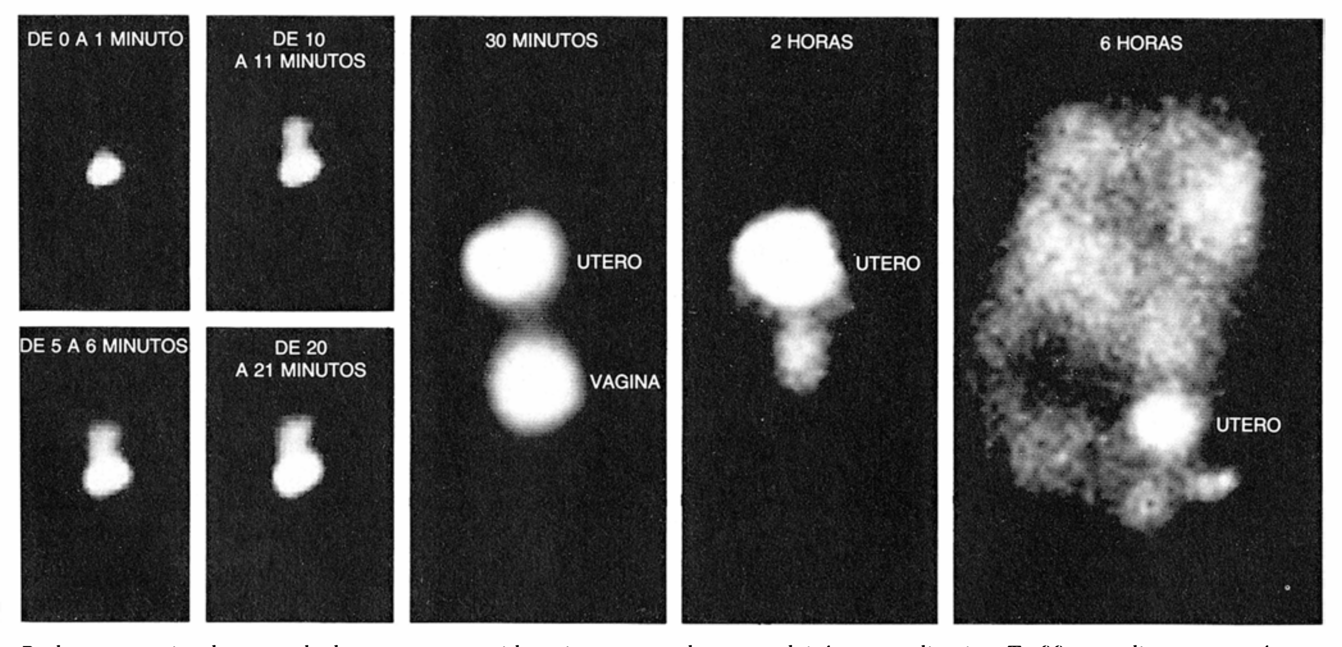
De esa forma se ha logrado investigar, por vez primera, la cinética de la distribución de los espermatozoides en el tracto genital, sin que ello implique ni la muerte ni la agresión de los animales involucrados en el experimento.

Una vez refinado y puesto a punto el protocolo metodológico, comenzamos las investigaciones. Variábamos el número de espermatozoides (un millón o cien millones) y el momento de la inseminación (doce y seis horas antes de la ovulación y durante la misma). De acuerdo con lo esperado, se observó que el número de los espermatozoides que remontaban el tracto guardaba una relación estrecha con la cantidad aportada. Comprobamos también que la velocidad de ascenso de los espermatozoides dependía de la proximidad del momento de la fecundación: más deprisa cuanto más cercano.

En un experimento aparte, abordamos el curso seguido por los espermatozoides vivos. Observamos también un transporte pasivo, aunque mínimo, de espermatozoides vivos y muertos. Estos resultados disuelven las contradicciones que han aparecido en estudios recientes acometidos con los métodos tradicionales.

Nuestra estrategia permite plantearse, asimismo, las posibles relaciones entre el curso de los espermatozoides y la fertilidad. En Alemania, si tomamos por ciertas las estadísticas publicadas, hay un 10 por ciento de parejas infecundas. A pesar de los esfuerzos de la medicina, se desconocen las causas del origen de un tercio de esa fracción.

Un factor decisivo podría residir en las alteraciones del comportamiento de los espermatozoides en su camino por el tracto genital, alteraciones que el nuevo método podría sacar a la luz. Y éste nos ofrece la posibilidad de estudiar los efectos de fármacos promotores de la fecundidad y los elementos agresivos contra el desenvolvimiento de los espermatozoides. (Andreas Bockish, de la Clínica de Medicina Nuclear de la Universidad de Maguncia, Hans-Jürgen Biersack, director de la Clínica de Medicina Nuclear de la Universidad de Bonn, y Dieter Krebs, de la Clínica de Mujeres de la Universidad de Bonn; con la colaboración este último de los doctores adscritos a ese servicio Klaus Diedrich y Saafa al-Hasani.)



Podemos seguir el curso de los espermatozoides vivos marcados con el isótopo radiactivo Tc-99m mediante una cámara detectora de rayos gamma. Se indica la situación de los espermatozoides en los primeros minutos subsiguientes a la fecundación, así como su movimiento por el tracto genital. La fijación de los espermatozoides ha quedado establecida ya a las dos horas. Doce horas más tarde, la mayoría de los espermatozoides están en la cavidad endométrica.

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Esporas de Lycoperdon

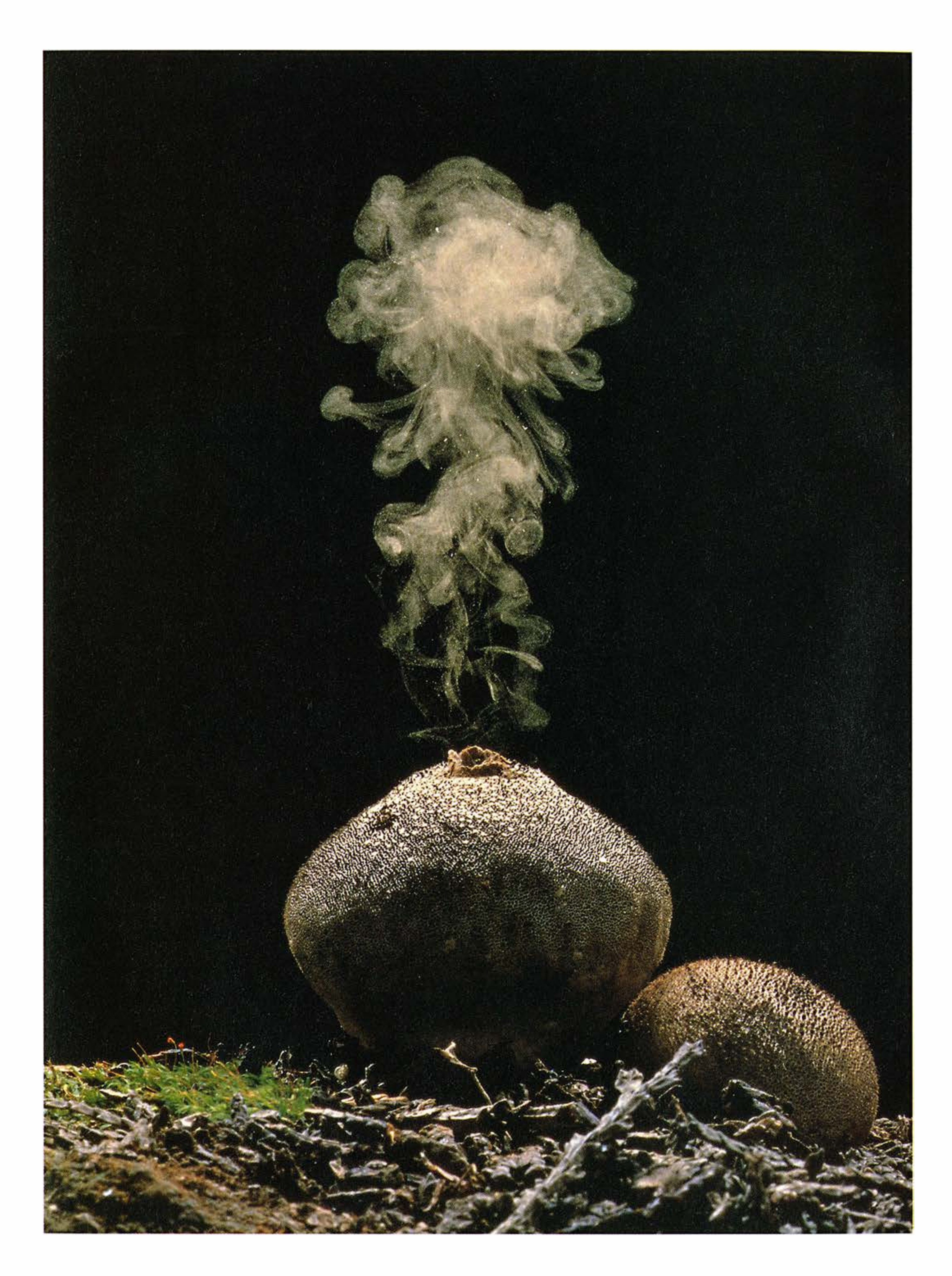
En los bosques umbríos de cedros del Japón crece el *Lycoperdon*, el eufemístico "crepitus lupi" para designar el vulgar "cuesco de lobo". Bajo ese nombre genérico se abrigan múltiples especies, cuyo tamaño varía desde el minúsculo guisante hasta formas gigantes, similares a la cabeza de un niño. Los carpóforos, o bolitas, que desarrollan miden entre dos y cinco centímetros de diámetro, en las especies más abundantes. Pero hay también carpóforos de 7-15 e incluso de 30 centímetros. Nadie diría que son hongos, y menos de los cirujanos por su capacidad de restañar la sangre de las heridas. Para ponderar su valor culinario habrá que atender a la especie particular de que estamos hablando, aunque suele cumplirse bastante bien la regla que afirma que el *Lycoperdon* es bueno siempre que la gleba sea blanca. El profano confunde esos hongos con bayas o piedras, hasta que los pisa.

Los pedos de lobo medran en los bosques, matorrales y prados de España, sobre todo en verano y otoño. Esos hongos gasteromicetes suelen presentar una figura piriforme, globosa o sacciforme, con dos capas en la cubierta, la interna desgarrada en el ápice hasta abrirse en un poro apical. Las esporas son globosas y miden de cuatro a cinco micrometros; las hay lisas o finamente berrugosas.

Llegada su madurez, sueltan, por la abertura apical, una masa negra o negruzca, las esporas, muy livianas, que vuelan impulsadas por el aire. Ese fenómeno liberalizador lo provoca a veces la lluvia que cae generosa en los bosques de cedros. Esa es la circunstancia que quiere sorprender la fotografía: a raíz del impacto de la gota salen despedidas las esporas en forma de nubecilla.

distancia focal: 100 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/10.000 segundo aprox.
película: ISO = 100





Origen del montar a caballo

El análisis de la dentadura de caballos procedentes de Ucrania revela que el origen de la cabalgadura aconteció hace 6000 años, mucho antes de lo que se había supuesto

David Anthony, Dimitri Y. Telegin y Dorcas Brown

El día en que el hombre montó a lomos de caballo y observó el mundo desde esa atalaya, cambió el curso de la historia. Apenas si exageraba aquel hipófilo francés cuando afirmaba que el hombre, amenazado por elementos que conspiran para destruirle y acosado por bestias más fuertes y rápidas que él, hubiese sido un esclavo si el caballo no le hubiese convertido en rey.

Se ha venido aceptando que la cabalgadura comenzó en Asia central cinco siglos antes de que apareciera, mil años antes de Cristo, la caballería militar en Oriente medio. Se trata de una opinión errónea. Las pruebas recientes, que se apoyan en el desgaste dental causado por el bocado en un caballo prehistórico, indican que los orígenes del cabalgar se remontan mucho más atrás. La relación trascendental entre caballo y jinete originó en la edad del Cobre la cultura Sredni Stog, que floreció en la Ucrania de hace 6000 años. El montar a caballo precede, pues, al transporte rodado, convirtiéndose en la primera innovación sustantiva del movimiento de bienes y personas por tierra. Más aún, la fecha y el lugar de aparición de los primeros jinetes respaldan, con nuevos datos, la vieja hipótesis según la cual hombres a caballo de las estepas euroasicas difundieron la familia indoeuropea de las lenguas, la que goza hoy de mayor extensión en todo el mundo.

Antes del 4300 a.C., aproximadamente, los caballos vivían en libertad, sin domesticar, y recorrían las vastas praderas que se extendían del este de Ucrania a Tien Shan y Mongolia. Había grupos reducidos de caballos en la Europa central y occidental, pero sólo adquirían importancia en la dieta humana los que vivían en los márgenes esteparios, donde constituirían grandes rebaños. Igual que sucedió con los búfalos de Norteamérica, fueron los principales herbívoros de cierta talla que pastaban en las llanuras.

Los caballos desenterrados en los yacimientos prehistóricos cumplirían alguna de las tres funciones siguientes: eran objeto, en su estado salvaje, de caza mayor; los domesticados eran fuente de carne, y, también, sirvieron éstos para la monta. ¿Cómo distinguir una u otra función? Entre los métodos sugeridos, se ha propuesto la investigación comparativa de dos poblaciones actuales de caballos salvajes. Joel Berger, de la Universidad de Nevada, ha estudiado los mustangs de Granite Range de Nevada; por su parte, Ronald R. Keiper, de la Universidad de Pennsylvania, y Daniel I. Rubenstein, de Princeton, se han ocupado de los ponies de la barrera de islas Eastern Shore (Virginia y Maryland). Los etólogos nos hablan de dos unidades sociales fundamentales en las que se integrarían los caballos salvajes: bandas de machos sin descendencia y harenes gobernados por un solo semental.

Los primeros, manadas de machos que no se reproducen, corren errantes grandes distancias, en tanto que el semental con su yeguada sigue rutas habituales, dejando rastros lineales de excrementos, que facilitaban la orientación de los cazadores. En los restos de los caballos cazados predominarían, pues, las yeguas adultas y sus crías que no habían llegado a la madurez sexual. Por contra, entre los caballos domesticados y aprovechados para carne abundarían los machos jóvenes, más obstinados y no necesarios para multiplicar el rebaño.

El sexo y la estructura por edades revelados por los huesos de los caballos que fueron consumidos por los humanos de la edad del Cobre deberían indicarnos la naturaleza domesticada o salvaje de los animales. Para nuestro infortunio, la determinación del sexo de los esqueletos resulta a menudo imposible, por cuanto depende de la conservación de las hileras de dientes de las mandíbulas superiores o inferiores: los machos poseen caninos, ausentes en las yeguas. Ahora bien, por ser las mandíbulas partes de escasa carne no llegan a la cocina, cuyos desperdicios constituyen el muestrario principal de los hallazgos arqueológicos. En consecuencia, para identificar los primeros caballos domesticados hubo que atender a rasgos distintos de los sexuales; en particular, a las medidas craneales y dimensiones de los huesos de las extremidades posteriores; pero ni unas ni otras aportaron datos concluyentes sobre la domesticación.

El principal yacimiento arqueológico para el estudio de los caballos primitivos se encuentra en Dereivka, aldea excavada por Telegin, uno de los autores, entre 1960 y 1967 y, de nuevo, en 1983. El asentamiento, uno de los cientos adscritos a la cultura Sredni Stog de la edad del Cobre ucraniana, se halla a 250 kilómetros al sur de Kiev, en la orilla oeste del río Dniéper, en una zona de transición entre la estepa boscosa del norte y la estepa genuina del sur. La cultura Sredni Stog debe su nombre a la isla del Dniéper donde se excavó la primera estación de esa civilización, que se desarrolló entre los años 4300 y 3500 a.C. Las cuatro fechas obtenidas por el método del radiocarbono confirman la ocupación de Dereivka en los alrededores del año 4000 a.C, siglo arriba, siglo abajo.

El descubrimiento de muelas y hoces de sílex indican que el pueblo Sredni Stog se dedicaba a la agricultura. La abundancia de huesos de bovinos, ovinos, caprinos y porcinos evidencia el cuidado de las cabañas. Pero

DAVID ANTHONY, DIMITRI Y. TELEGIN y DORCAS BROWN estudian la prehistoria cultural de Europa oriental. Anthony es profesor de antropología en el Hartwick College de Oneonta, Nueva York. Brown, su mujer y docente también en Hartwick, ha colaborado en el mismo campo y ha dirigido trabajos sobre los desgastes causados por el freno en el caballo. Telegin es investigador del Instituto ucraniano de Arqueología en Kiev, es autoridad mundial en el Neolítico de Ucrania.

la nota económica distintiva de esta civilización la aportan los caballos.

Expresado en porcentaje con respecto a los desperdicios, los huesos de caballos representan, entre los Sredni Stog, alrededor del doble de lo observado en civilizaciones anteriores de la región. Comían más carne de caballo y lo hacían también en zonas boscosas más septrentrionales, de riego abundante y a donde no se acercaban los caballos salvajes; los restos allí encontrados debieron corresponder a animales llevados de intento hasta el lugar.

El mayor consumo de carne de caballo sugiere la domesticación del animal para ese fin, alrededor de la fecha citada. Se trataría de un espléndido recurso, pues los caballos, a diferencia del ganado vacuno y ovino, estaban en su medio de origen y requeríanse menos cuidados, en particular durante los rudos meses de invierno. No tardarían mucho en crear corrales y alguien tendría la feliz idea de montarlos.

En Dereivka tenemos documentadas esas tendencias hacia una mayor explotación. Los 2412 huesos de caballo recuperados de pilas revueltas de desperdicios (acumulados a buen seguro en el curso de distintas ocupaciones del yacimiento) constituyen el 61,2 por ciento de todos los huesos animales identificables. Representan unos 52 individuos sacrificados, que aportarían unas 15.000 libras de carne, cantidad que correspondería al 60 por ciento del peso de la carne de toda la fauna encontrada en el lugar.

Sólo seis fragmentos mandibulares pueden atribuirse inequívocamente a un sexo, al masculino. De ello se infiere que la mayoría de los animales de Dereivka (la inmensa mayoría) eran machos. Sabemos que la manada de yeguas salvajes admite sólo un 30 por ciento de machos, contando los potrillos, y que una muestra aleatoria de una población salvaje abarcaría algo menos del 50 por ciento de machos. Por consiguiente, podemos esperar que los caballos sacrificados se tomaran de un rebaño domesticado. Por otra parte, los análisis de las edades de los caballos de Dereivka revelan que la mayoría fueron sacrificados entre los seis y los ocho años, con más edad de lo que podría esperarse de una muestra de machos jóvenes. El yacimiento encierra probablemente restos de équidos salvajes y domesticados.

El descubrimiento más espectacular correspondió a un ejemplar que había recibido un trato singular. Era un semental de siete u ocho años de edad, cuya cabeza y extremidad anterior izquierda se encontraron en un depósito ritual con los restos articulados de dos perros. Traídos intencionadamente, así parece, llegaron allí pieles y pellejos con las cabezas enteras y los huesos de las extremidades o de la columna vertebral de los tres aún adheridos. Los obreros encontraron por los alrededores una figura de arcilla modelada con forma de verraco y fragmentos de otras de apariencia humana. Había también dos trozos perforados de asta: las piezas correspondientes a los carrillos de un freno.

El conjunto entero constituía un yacimiento ritual: la agrupación de caballos, perros y figuras antropomórficas denuncian sin ambages la domesticación del caballo. La costumbre ritual en la que, sobre una vara, se extiende una piel de caballo con su cabeza y extremidades para marcar un lugar sagrado goza de amplia documentación en la Europa precristiana. El rito se practicó hasta nuestro siglo, en los pueblos buriato y oirot, que viven entre los montes Altai y el lago Baikal; quizá persista todavía.

El semental del culto pertenece, sin ninguna duda, a la civilización Sredni Stog. Se encontró en un suelo de la edad del Cobre, donde fue arrojado o quizá colocado, para accidentalmente ser cubierto por los desperdicios de la cultura Sredni Stog. Esa situación con-



1. PIELES DE CABALLOS colgando de varas en una recreación danesa de un rito de la Europa precristiana. Un semental semejante a éste, encontrado junto a dos perros en un lugar de Ucrania de hace 6000 años, muestra marcas dentarias producidas por el freno. Constituye el vestigio de monta de caballos más antiguo que se conoce. El conjunto recuerda los mitos indoeuropeos del caballo que transporta las almas hasta el Hades.







2. ESCASEAN LOS TESTIMONIOS de la domesticación entre los restos de la edad del Cobre, como el de este "cetro" de cabeza de caballo (*arriba, a la izquierda*), procedente de Drama en Bulgaria. La primera prueba inequívoca data de la edad del Bronce y es una talla en roca de caballo con jinete (*abajo, a la izquierda*), en Kammenaya Mogila, Ucrania. Los jinetes avanzaron rápidamente hacia el este (*mapa*) ocupando las estepas; tardarían más en penetrar las regiones colonizadas de occidente. Las carrozas arrastradas por caballos alcanzan Oriente Medio hacia el 1800 a.C.

cuerda con la que cabría esperar de un ofrecimiento ritual de cabeza y piel montadas sobre una vara; no resulta verosímil, por contra, que el semental del culto procediera de una fosa excavada por un pueblo que llegara más tarde.

Las piezas de asta de las mejillas (en la hipótesis de que pertenecieran efectivamente a un bocado) son similares a otras que se han aducido para corroborar la existencia de equitación en la edad del Cobre; nos referimos al par procedente de una sepultura Sredni Stog en Aleksandrija (que estaba exenta de restos de caballos) y a otras desenterradas de estaciones contemporáneas de Polonia y Alemania. Ahora bien, aunque se usaron, 2000 años después, carrillos de asta similares formando parte de los arneses de caballos de la edad del Bronce, los ejemplares recordados de la edad del Cobre no aportan una demostración tajante de la existencia de la monta.

Otro grupo sugestivo de artefactos, analizado por uno de los autores (Telegin), lo tenemos en las pétreas cabezas de maza pulimentadas; se han desenterrado en yacimientos muy dispares de la edad del Cobre tardío, en las estepas y zonas adyacentes del sureste europeo. Los cetros más primitivos no debieron de moldear figuras animales; sí sucedió así en los ejemplares posteriores, de 3500 a 3000 años antes de Cristo, que representan cabezas de caballos e insinúan a veces tirantes de arneses. Estos últimos encajan mejor en una cultura Yamna, posterior a la Sredni Stog. Combinan las imágenes de un caballo con el simbolismo de la riqueza y están hechos de piedras porfíricas exóticas. La misma maza simboliza también el poder militar. Ningún otro animal recibe una representación semejante en la Europa de la edad del Cobre. Mas ni siquiera así las mazas constituyen una prueba de la práctica de la cabalgadura.

Al no haber ningún artefacto que señalase inequívocamente el principio de la monta, decidimos fijarnos en la boca. Si a los primeros caballos que se montaron se les puso freno, razonábamos, sus dientes premolares mostrarían señales microscópicas aunque el bocado fuera de cuerda. Supuesto que algunos veterinarios cuestionaron, apoyados en la idea de que el bocado permanece sobre los suaves tejidos de la boca, donde un ligero tirón de las riendas causa una fuerte molestia, suficiente para controlar al animal. Un freno bien ajustado descansaría sobre las encías y lengua, en el espacio entre incisivos y premolares.

Pero los mayorales nos habían comentado que los frenos no siempren se apoyan donde debieran. Conocimiento práctico que se confirmó con fotografías fluoroscópicas de rayos X, tomadas de caballos que mordisqueaban sus bocados por Hilary M. Clayton, de la Universidad de Saskatchewan. Las fotografías evidenciaban que, si el freno no se ajustaba cabalmente, el animal elevaba y retraía su lengua, retrasando el bocado hacia los primeros premolares. Los ángulos carnosos de la boca están muy adelantados de los premolares, lo que obliga al animal a tirar del freno hacia sus carrillos y sujetarlo con firmeza entre sus premolares, para evitar que las mejillas lo desplacen a las encías.

El caballo que pugne así con su bocado, lo moverá una y otra vez sobre la parte anterior de la cara oclusal (masticadora) de sus primeros premolares, donde, por su precaria sujeción, el bocado se desliza sobre la parte delantera del diente. La fuerza vigorosa con que el caballo aprieta el freno entre sus dientes y la tendencia del bocado a deslizarse hacia atrás y adelante sobre la proa del diente provocan el desgaste dentario.

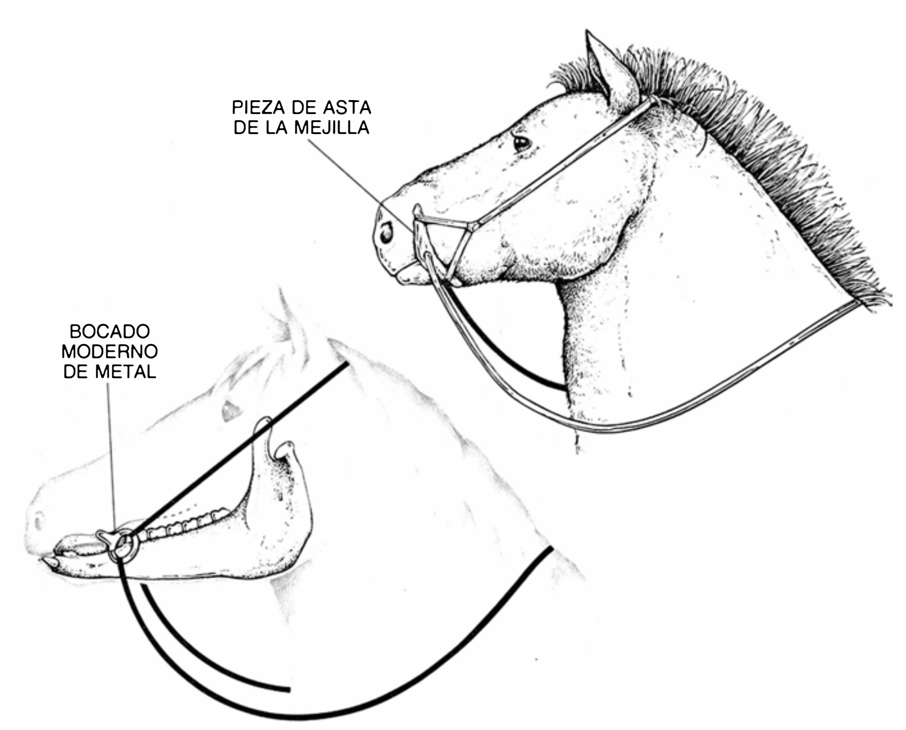
Anthony y Brown, dos de los autores, examinaron los dientes premolares inferiores de 10 caballos domesticados actuales que habían estado sometidos al freno y de 20 ejemplares salvajes de Nevada y de las barreras de islas de Virginia (que jamás llevaron bocado). El microscopio electrónico de barrido distinguía con absoluta nitidez el daño causado por el freno del desgaste oclusal natural. El freno origina una alteración a la que se llega a través de cuatro tipo de pistas. Primera, la coherencia en la ubicación del deterioro: el esmalte oclusal de la primera corona deja marcas en forma de cicatrices en los lados de los carrillos correspondientes a los dientes, en la lengua y en la proa. Segunda, las marcas dibujan un modelo característico. Los desconchones (pequeñas fracturas) parten del centro de la superficie del esmalte

que sobresale, algunas veces entramándose para formar grietas en surco que recorren el puente del esmalte. Tercera, los movimientos hacia atrás y hacia adelante del freno sobre el esmalte roto y desgastado crean, en el interior de los desconchones, unas áreas irregulares llamadas fracturas de escalones desgastados. Por último, la primera corona muestra desgaste hacia la parte anterior de la boca.

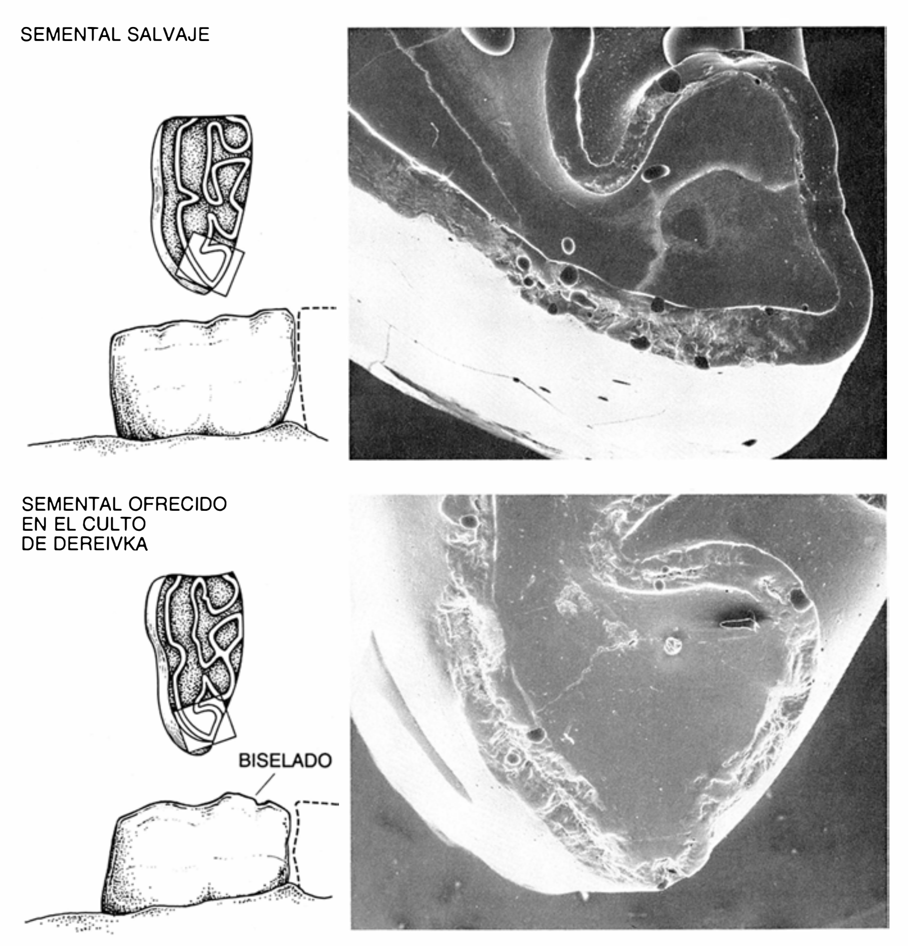
En los caballos actuales, la parte anterior de los dientes sufre un desgaste medio de 3,56 milímetros, según demuestran las observaciones microscópicas de las erosiones generadas por el freno; cifra que contrasta con la media de desgaste registrada en los caballos salvajes: sólo 0,82 milímetros. Y no acaba ahí la diferencia; el esmalte oclusal de estos caballos es generalmente muy liso y pulido, sin la menor marca de la primera corona de los caballos sujetos a bocado. Un tercio de los salvajes exhiben algunas fracturas del esmalte en el lado labial de la primera corona, pero nunca en el lado lingual (la lesión de la mejilla se produce de manera natural por su forma de masticar). Mas ni siquiera en tales casos se han descubierto, entre la población salvaje, modelos dentales susceptibles de confundirse con el desgaste por bocado.

Equipados con estos conocimientos, Anthony y Brown se dirigieron a Kiev, invitados por la Academia de Ciencias Ucraniana. Con Telegin y la arqueozoóloga Natalya Belan-Timchenco estudiamos los dientes pertenecientes a una muestra muy amplia de caballos prehistóricos. Hicimos unos moldes ajustados de los premolares inferiores recuperados de lugares cuya antigüedad oscilaba desde 25.000 años a sólo 1000 años. El análisis de los moldes en los EE.UU. puso de manifiesto que los dientes fechados antes del 4000 a.C. carecían de biseles o señales microscópicas, indicativas de uso del freno. Por contra, el semental destinado al culto en Dereivka sí portaba biselados los premolares anteriores, con un desbaste de 3,5 milímetros, casi exactamente la media de nuestra muestra control de desgaste por freno y muy alejados de los 0,82 registrados en los équidos salvajes.

Cuando examinamos en un microscopio electrónico de barrido los moldes de los premolares del semental, nos encontramos con todos los microcaracteres propios del desgaste por bocado. En la primera corona sobresalían el biselado, los desconchados centrífugos y las fracturas en escalón. El desgaste quedaba confinado en la zona biselada, sin prolongarse por la parte posterior del mismo diente. Además, debido a que el semental se abandonó



3. SEMENTAL DE DEREIVKA (*arriba*), **reconstruido. Ejemplar de cabeza sólida, se le sujetaba con un bocado de cuerda unido por piezas de asta de venado correspondientes a los carrillos. En los caballos modernos** (*abajo*), **los frenos se colocan de forma que descansen en los tejidos blandos, pero el animal tiende a llevarlos a los dientes.**



4. LECTURA DE LOS DIENTES. El perfil del diente del caballo salvaje (*arriba*) **no es biselado; las fracturas se dan en el lado labial de la superficie masticadora** (*micrografía*). **El diente del semental de Dereivka** (*abajo*), **biselado, está hendido por numerosas fracturas provocadas por el freno.**

con su cabeza y pezuñas rituales, se conservó la mandíbula superior, que pudimos estudiar en su correspondencia con la inferior. Ningún desgaste observado pudo atribuirse a un cierre defectuoso. El semental llevó, pues, freno, gobernado desde atrás. Tiraría de las riendas un jinete o un conductor de vehículo rodado. Si recordamos que la rueda no se inventaría hasta quinientos años después de ese episodio, habrá que aceptar que ese caballo sólo pudo ser una montura. La primera cabalgadura que conozcamos.

No deja de producir extrañeza que ninguno de los otros cuatro premolares inferiores de Dereivka ofrezca signos inequívocos de desgaste por freno. Estos dientes formaban parte de las sobras del fogón y procedían, a buen seguro, de caballos sacrificados para su consumo. Tan sólo el individuo escogido para el rito, con los dos perros, muestra señales claras de haber sido usado de montura.

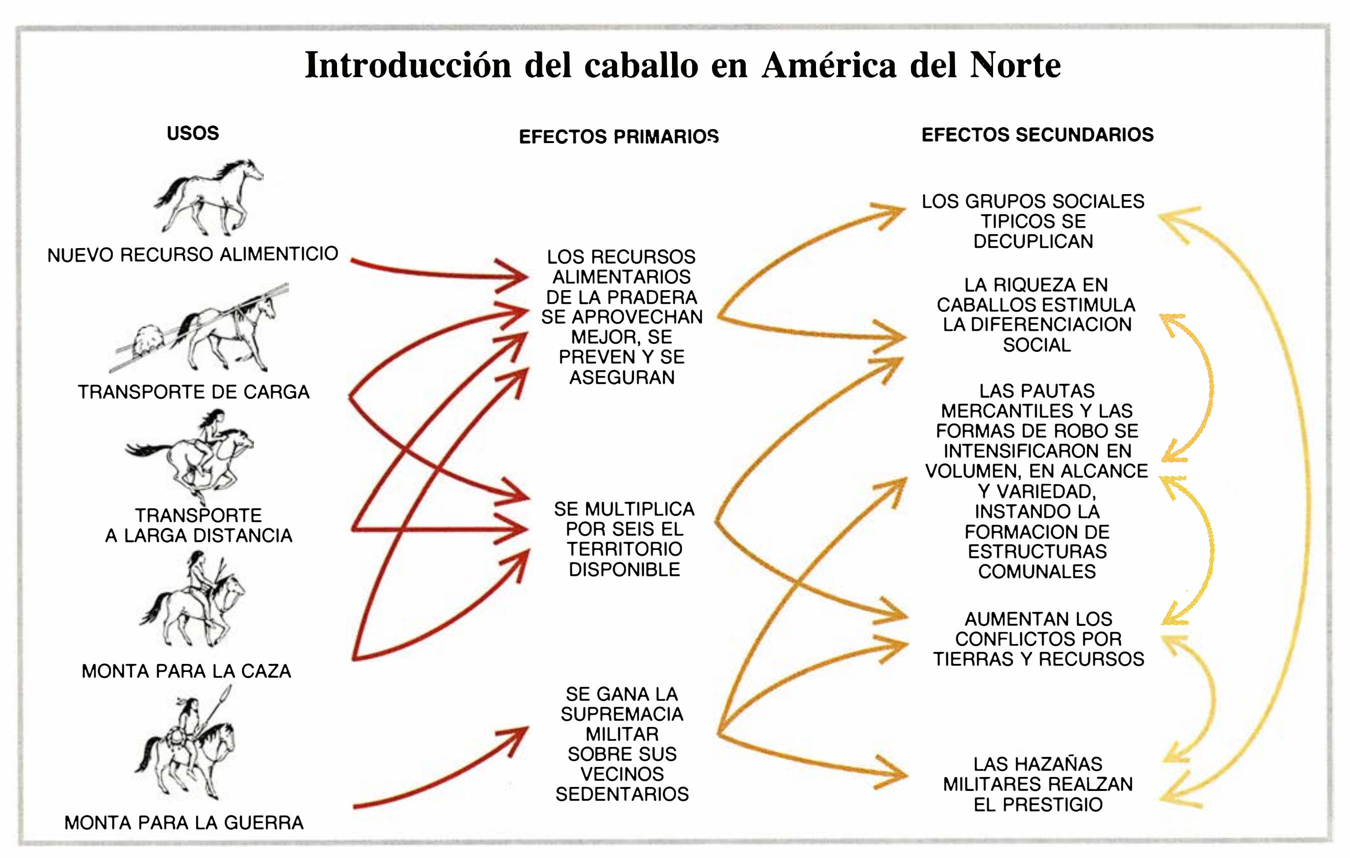
Pero no limitamos nuestra investigación al conocimiento de la fecha en que se inventó la cabalgadura. ¿Qué efecto ejerció tal hallazgo en la sociedad europea del Cobre tardío, que transcurrió del 4000 al 3000 a.C., aproximadamente? Andrew Sherratt, del Museo Ashmoleano de Oxford, y Sandor Bökönyi, de la Academia Húngara de Ciencias, entre otros, sostienen que los profundos cambios sociales y económicos operados vinieron promovidos por la explotación animal: indumentaria (lana), alimentación (leche) y fuente de energía (monta y tiro). Por consiguiente, si la montura precedió a los vehículos de ruedas, podremos distinguir los efectos que produjo de los asociados al tiro de carruaje.

Las respuestas culturales recogidas en el Nuevo Mundo proporcionan un modelo útil para reconstruir el impacto de montar los caballos en Ucrania durante la edad del Cobre. Los caballos pueden haber representado la avanzadilla de la penetración de la vida europea en Norteamérica. Derivaban de los llevados al Nuevo Mundo por España e introducidos por los colonizadores, a finales del siglo XVII, en Nuevo México. Algunos caballos escaparían, otros serían vendidos de un pueblo indígena a otro a lo largo de una cadena que llegaría hasta la región central del continente. Las tribus dominaron la cabalgadura bastante antes de que conociesen el uso de las escopetas, las enfermedades procedentes de Europa, los comerciantes europeos y otros aspectos de la vida de Occidente. Significa ello que podemos estudiar el efecto que tuvo en su modo de vida la montura, y hacerlo en parte por separado de otros influjos, durante el período comprendido entre 1680 y 1750.

La incorporación del caballo revolucionó la vida de las tribus de las llanuras. En un día, los jinetes doblaban de lejos la distancia que podía cubrirse andando, y más deprisa. Recursos, enemigos, aliados y mercados hasta entonces inalcanzables, se hicieron de pronto accesibles. Las otrora inseguras subsistencia y supervivencia económica en las secas praderas, llenas de peligros para los cazadores, entraron en un ritmo de previsión y abundancia. Las aldeas campesinas, cuyo asentamiento en los valles fluviales las había convertido en centros de las poblaciones y de la productividad económica, se tornaron vulnerables a las incursiones relámpago de los enemigos montados a caballo que no podían ser perseguidos o castigados. Se abandonaron muchas aldeas y sus ocupantes se convirtieron en cazadores a caballo en un proceso transformador de autodefensa. Así aconteció con los cheyenne, los arapaho y los crow.

La guerra redobló su intensidad e importancia social: los caballos se convirtieron en signo de riqueza, que fácilmente se podía robar, y las sociedades de jinetes redibujaron nuevas fronteras étnicas, basadas hasta entonces en longitud de camino a andar. Los sistemas de comercio e intercambio se expandieron, haciéndose socialmente más complejo y transportando un volumen mayor de mercancías (caballos incluidos). De manera independiente, ese fenómeno vino a repetirse en Sudamérica.

Y cambios parecidos son los que debieron de darse en la cultura Sredni Stog, conocida bien tras las excavaciones en más de 200 yacimientos de los valles fluviales de las llanuras de Ucrania. Los asentamientos constaban



de pocas viviendas, de construcción endeble y en las que vivirían juntos grandes grupos familiares. Se dedicaron a la caza, la pesca, la agricultura y la ganadería de vacuno y ovejas, quizás esta última actividad a lomo de caballos. Enterraban a sus muertos en pequeños cementerios de 10 a 30 tumbas; dejándoles en dádiva uno o dos útiles muy simples. Algunas sepulturas contenían, sin embargo, ornamentos de cobre, abalorios de conchas y avíos de fino pedernal, indicios de la emergencia de una élite incipiente.

Cabría esperar que los Sredni Stog, conquistada la montura, entraran en un nuevo tipo de relaciones con sus vecinos, a imagen de lo que vimos sucedió con los aborígenes de América. Y, en efecto, hubo cambios sustanciales. En el período tardío de la cultura Sredni Stog, representado en Dereivka, comenzaron a aparecer ornamentos de cobre en tumbas en número y variedad desconocidos hasta entonces al este del Dniéper.

Esos adornos proceden de la civilización Cucuteni-Tripolye, que floreció del 4500 al 3500 a.C. en el altiplano boscoso que hay entre el río Dniéper y los montes Cárpatos. Contaba con grandes ciudades agrícolas y muchas aldeas pequeñas, conocía la metalurgia del cobre, construía edificios de dos pisos y ofrecía ritos que ligaban estatuillas femeninas con semillas y vasos de cerámica policromada elaborados con técnica refinada. Aparecen también, en cementerios a 900 kilómetros al este de Dereivka, adornos de cobre del tipo Cucuteni-Tripolye y de composición espectrográfica. Ornamentación que se transportaría a puntos tan distantes como Khvalynsk, en el curso medio del Volga, presumiblemente por intermediarios o comerciantes Sredni Stog.

La montura que ponía en contacto culturas alejadas movió lo mismo a la guerra que al comercio. Los asentamientos de Cucuteni-Tripolye, ya de cierto tamaño, se extendieron hasta cubrir más de 300 hectáreas con un millar de edificios. Tal concentración humana, sin precedentes, admite, en el fondo, una explicación defensiva. Más aún: hacia el 3800 a.C. y a unos 600 kilómetros al oeste del Dniéper, en Hungría oriental y el occidente de Rumanía, aparecen cementerios que recuerdan los de la cultura Sredni Stog. Todos esos nuevos fenómenos derivarían del dominio de la montura: el enriquecimiento de la civilización Sredni Stog, la expansión del comercio y de las comunicaciones a través de la estepa, la concentración defensiva de las poblaciones labradoras sedentarias y el movimiento de grupos Sredni Stog hacia regiones ricas en recursos que ellos nunca habían podido explotar.



5. DESPLAZAMIENTO DEL FRENO, evidenciado en esta escena de jinetes afganos. El caballo mueve los bocados hacia los dientes para aliviar la presión que ejercen sobre los tejidos delicados.

Es posible que los primeros jinetes hablasen protoindoeuropeo. Los lingüistas han reconstruido ese idioma, hace tiempo extinguido, a partir de los testimonios de las lenguas que descienden del mismo: sánscrito, griego homérico y latín, y, entre los modernos, inglés, francés, ruso y persa.

A lo largo de los últimos cien años, más de un arqueólogo y de un filólogo han buscado la patria del indoeuropeo en las estepas de Ucrania, especialmente entre las ruinas ricas en restos hipológicos de los Yamna, una cultura desgajada de la Sredni Stog que se propagó hacia el norte de los mares Negro y Caspio. James Mallory, del Queens College de Belfast, ha resucitado la hipótesis de la patria ucraniana. Para otros, sin embargo, las lenguas indoeuropeas irradiáronse desde Anatolia con la expansión de los primeros colonos del Neolítico, mucho antes de la domesticación del caballo.

Tampoco los autores de este artículo compartimos una misma opinión sobre el origen de la patria indoeuropea. Ahora bien, si las estepas de Ucrania prestaron medios de subsistencia a quienes hablaban alguno de los primitivos dialectos indoeuropeos (hipótesis en la que coincidimos), su invención allí de la montura, en torno al cuarto milenio antes de Cristo, aporta un mecanismo posible de su dispersión.

El despliegue hacia las estepas del este pudo haberse realizado adoptando una nueva estrategia económica basada en el pastoreo de las praderas y en la agricultura a pequeña escala en los valles fluviales. Las profundas praderas constituían un ambiente hostil, incapaces de alimentar aglomeraciones humanas antes de la invención de la cabalgadura. La verdad es que la caballería transformó las vastas praderas europeas, consideradas hasta entonces un muro infranqueable, en vías de comunicación y comercio.

La dispersión hacia oriente de los primeros jinetes apenas habría encontrado resistencia, muy aislada además. El despliegue hacia poniente sería mucho más compleja, hallando a su paso sociedades agrícolas de la Europa de la edad del Cobre bien establecidas. Los datos arqueológicos y los modelos hipotéticos de migración tienden a apoyar la teoría de que tales movimientos procedieron primero en dirección este y, luego, en dirección oeste, entre los años 3500 y 3000 a.C.

En todos estos progresos el caballo desempeñó un papel crítico, como continuaría haciéndolo en los principales acontecimientos humanos de los cinco milenios subsiguientes. Sólo ahora sabemos con certeza que se tardó mucho en difundir la montura del caballo hacía el sur, hacia Oriente Medio. Allí aparecen alrededor del 2200 o 2000 a.C., para sustituir a los asnos o a los híbridos asnos x onagros, animales de tiro uncidos a los carros de combate. La mayor talla y velocidad del caballo, y quizá los nuevos métodos de gobierno basados en el uso del freno, contribuyeron al perfeccionamiento de los carros de guerra alrededor del 1800 a.C.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE "KURGAN CULTURE", INDO-EUROPEAN ORIGINS, AND THE DOMESTICATION OF THE HORSE: A RECONSIDERATION. David W. Anthony en *Current Anthropology*, vol. 27, n.º 4, págs. 291-313; agosto-octubre de 1991.

THE DOMESTICATION OF THE HORSE. David W. Anthony en *Equids in the Ancient World*, vol. 2. Dirigido por Richard H. Meadow y Hans-Peter Uerpmann. Ludwig Reichert Verlag, 1991.

THE ORIGINS OF HORSEBACK RIDING. David W. Anthony y Dorcas R. Brown en *Antiquity*, vol. 65, n.º 246, págs. 22-38; marzo de 1991.

Ecosistemas microbianos antárticos

Algunos organismos disponen de interesantes estrategias adaptativas que permiten su supervivencia en unas condiciones ambientales inalcanzables para la mayoría de los seres vivos

Josefina Castellví, Ramón Fontarnau y Jesús Guinea

Desde comienzos de la década de los ochenta, se advierte en la prensa diaria un obvio interés hacia sucesos ocurridos en la Antártida. Así ha podido el público profano conocer gradualmente distintos aspectos de esta región, enigmática y lejana, de la Tierra. El contenido informativo es amplio. Salen a la palestra las cuestiones políticas, como las relacionadas con la revisión del Tratado Antártico, recientemente firmado, o el establecimiento de bases por organizaciones privadas o no gubernamentales. Las más llamativas, quizá, las noticias que divulgan la enorme riqueza protegida bajo los hielos: reservas de petróleo y minerales de elevado valor.

Poco a poco, con especial intensidad desde los últimos años, se han ido abriendo paso las informaciones concernientes a los trabajos llevados a cabo por grupos de científicos desplazados hasta aquel continente. Se aportan resultados obtenidos in situ, pero se recogen también otros conseguidos a través de muestras que se han trasladado hasta laboratorios especializados. Por citar ejemplos que estén en la mente de todos, recordaremos el problema del agujero de ozono, el posible aumento del nivel de las aguas como consecuencia del efecto invernadero, que desencadenaría una auténtica catástrofe en las costas occidentales antárticas, o el que trata de la esperada analogía geológica y paleontológica entre el continente antártico y los continentes vecinos.

La severidad del clima antártico influye decisivamente en la distribución y actividad de los seres vivos. Los biogeógrafos especializados en el ambiente antártico han venido distinguiendo tradicionalmente varias zonas climáticas. La clasificación de R. I. Lewis Smith reconoce tres regiones, claramente diferenciadas: subantártica, Antártida marítima y Antártida continental.

La región subantártica, representada por las islas Faklands (Malvinas), se caracteriza por la presencia de un clima oceánico frío, con unas temperaturas próximas a cero grados durante seis meses y una precipitación anual próxima a los 900 milímetros. La tundra es su vegetación representativa y abundan aves e insectos.

La Antártida marítima se distingue por la existencia de temperaturas medias cercanas a los cero grados y temperaturas de invierno con rangos que oscilan entre los -10°C y -35°C. No hay plantas vasculares, aunque se han descrito dos angiospermas, una gramínea perteneciente a la especie *Deschampia antarctica* y otra planta herbácea perteneciente a la especie *Colobanthus quitensis*. La Antártida marítima puede subdividirse en dos zonas o provincias: la del norte, que incluye las Sandwich del Sur, las Orcadas del Sur y las Shetland del Sur, así como parte de la costa oeste de la península Antártica; y la zona del sur, que abarca el resto de la costa oeste de la península, las islas asociadas y la costa noreste de la península Antártica. Las diferencias climáticas entre ambas son claras; la zona norte aún recibe entre 350-500 milímetros de precipitación anual, en su mayoría en forma de lluvia, mientras que la zona meridional, más seca y fría, posee un índice de pluviosidad inferior a los 350 milímetros anuales.

La región de la Antártida continental es muy fría. Las formas de vida están allí representadas por algas unicelulares. Considerando su extensión (alrededor de doce millones de km^2), es fácil comprender que se distingan varias zonas caracterizadas por su régimen de vientos y temperaturas. En la costa las temperaturas sobrepasan los cero grados durante el período diciembre-enero. Durante el resto del año, la temperatura oscila entre -5°C y -25°C. La vegetación, semidesértica, es muy escasa y queda restringida a especies de muscíneas y líquenes. Por otra parte, las laderas que unen la zona costera y la plataforma central mantienen una temperatura media inferior a los -5°C y una precipitación anual que se aproxima a los 100 milímetros. En estos lugares sólo medran algunas colonias de musgos y líquenes. La plataforma central tiene una altitud cercana a los 2000 metros y en ella se han registrado las temperaturas más bajas del planeta, concretamente de -89°C, en las cercanías de la base soviética de Vostok.

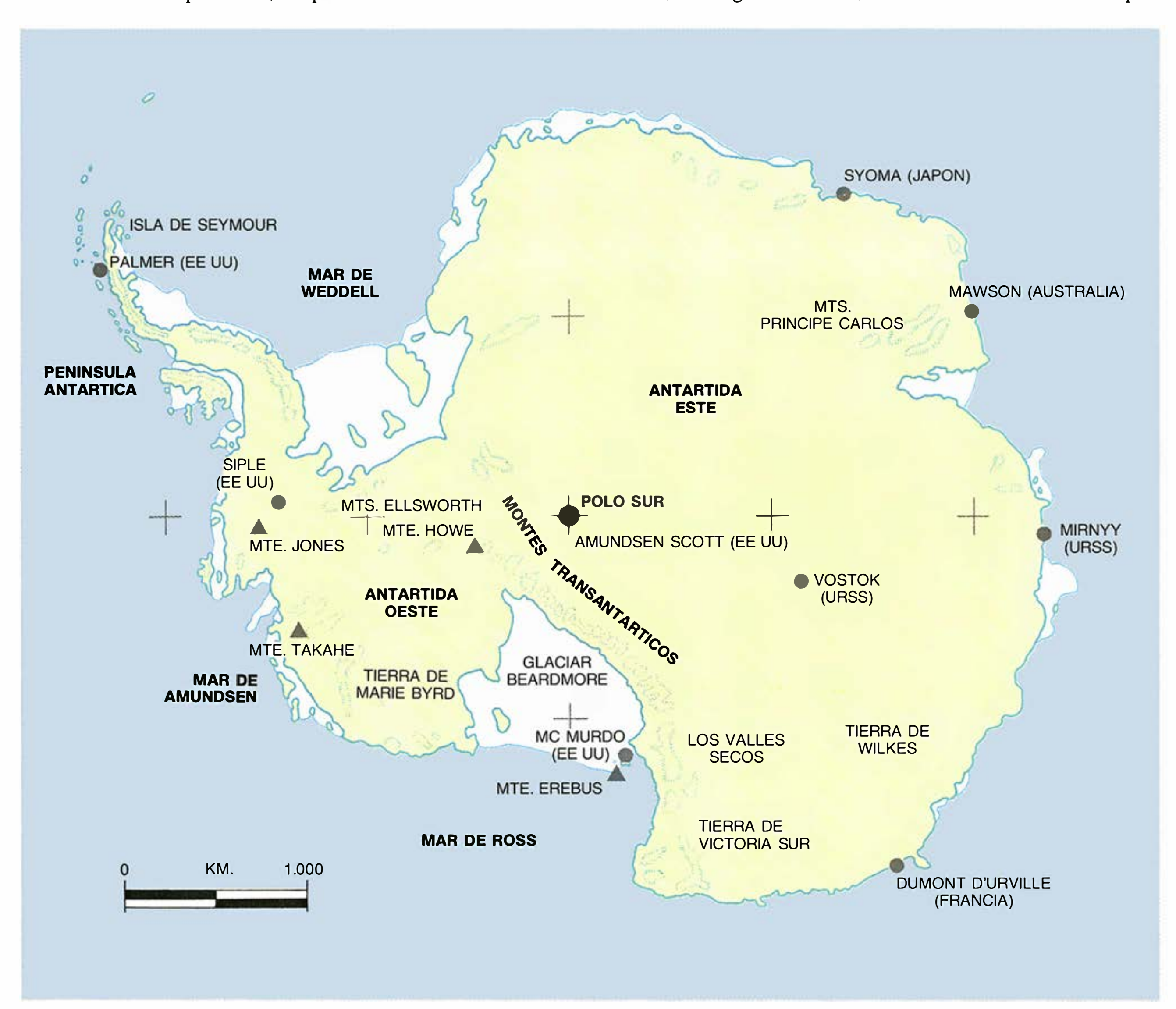
El intenso frío que rige de una manera constante en el continente da origen a una serie de sucesos de trascen-

JOSEFINA CASTELLVI, RAMON FONTARNAU y JESUS GUINEA han colaborado, desde frentes distintos, en la preparación y redacción del artículo. Castellví, doctora en biología por la Universidad de Barcelona, viene trabajando en oceanografía desde 1960, en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Inició su actividad antártica a partir de 1984 y ha realizado seis campañas científicas en aquel continente. Fontarnau se formó también en la Universidad de Barcelona, en cuyo servicio de microscopía electrónica ingresó en 1967; desde entonces ha desempeñado cargos de responsabilidad en el mismo, compaginados con labores docentes en diversos centros superiores. Guinea, catedrático de microbiología de la facultad de farmacia de la Universidad de Barcelona, es coautor de varios libros y numerosos artículos de investigación, relacionados en particular con aspectos genéticos y fisiológicos de bacterias gram-negativas.

dencia mundial. En este sentido, es interesante recordar que la mayor reserva de agua dulce se encuentra en la Antártida. Es una reserva sólida que convierte a la región del polo Sur en el auténtico regulador del nivel de los océanos. Un calentamiento progresivo del planeta produciría una descongelación parcial de la masa de hielos y, en consecuencia, un incremento peligroso del agua total circulante.

Pero la singularidad y dureza del clima antártico se complementa con otros factores meteorológicos interrelacionados, como la presión y fuertes vientos. En efecto, el continente antártico está rodeado de núcleos de bajas presiones —980 y 998 milibares— en latitudes de 60 y 70ºS. Estos núcleos se encuentran comprendidos entre dos sistemas de altas presiones, el primero ubicado en la zona central del continente y un segundo que está formado por anticiclones subtropicales de 1034 y 1040 milibares. A consecuencia de la rotación de la Tierra, los vientos que soplan desde el norte son desviados hacia el este, produciéndose corrientes que alcanzan velocidades del orden de 10 metros por segundo. Estos vientos, al llegar a las zonas de bajas presiones, aumentan su velocidad dando lugar a una curiosa terminología, en función de su fuerza y latitud, entre los marinos conocedores de la zona. De este modo se habla de los "cuarenta rugientes", "cincuenta silbantes" y "sesenta ululantes". A esta circulación general se superponen núcleos de bajas presiones que se desplazan desde el noroeste hacia el suroeste.

Considerando su sentido, es lógico que desde la región sur se produzcan corrientes que circulen de este a oeste. Así, la circulación general de los vientos antárticos cursa en el sentido de las agujas del reloj. Sin embargo, en varias ocasiones la topografía local dirige la dirección de los vientos. Es el caso de los vientos catabáticos o corrientes de aire denso y frío que descienden a grandes velocidades hasta el fondo de los valles, alcanzando la superficie del mar, disminuyendo su temperatura y aumentando por lo tanto su densidad. Con ello se provoca un hundimiento de grandes masas de agua, ricas en nutrientes, fundamentalmente en silicatos, hasta que alcanzan su nivel de compensación. Estas masas de agua se desplazan, en virtud de la dinámica de las corrientes marinas, hasta latitudes insospechadas de los océanos Indico, Atlántico o Pacífico. La pre-



1. CONTINENTE ANTARTICO, objeto de creciente atención por parte de los científicos desde 1957, año Geofísico Internacional. Tras una etapa inicial, de principios de siglo, caracterizada por los descubrimientos geográficos y la conquista de ciertas latitudes, ha venido otra dedicada a la organización de expediciones exclusivamente científicas. Todos los países pertenecientes al Tratado Antártico han establecido sus bases, ya sea en el continente o en las islas que forman la llamada Antártida marítima. En la figura se observa la ubicación de algunos asentamientos.

sencia de dichas masas en lugares tan distantes de su formación resultan muy difíciles de interpretar si no se conoce su origen.

Un aspecto importante que ayuda a la comprensión de la biogeografía de la Antártida tiene que ver con la radiación reflejada sobre el hielo o nieve que cubre durante todo el año al continente y estacionalmente al océano circundante. La magnitud de la radiación reflejada es tal, que puede afirmarse sin miedo a errar que las tres cuartas partes de la luz solar tornan a la atmósfera. Se entiende así que la radiación neta, suma de las radiaciones de longitud de onda corta y larga, sea positiva en las zonas antárticas libres de hielo y nieve, pero claramente negativa en las zonas cubiertas. Lo que explica, en otro sentido, que, en las regiones libres de hielo, haya una energía disponible que no existe en el inmenso bloque de hielo que forma la Antártida central. Aunque nada impide que el centro del continente antártico reciba en determinadas ocasiones masas de aire caliente procedentes de las costas del norte que compensen de esa forma la continua pérdida de calor.

Como puede apreciarse, el hielo constituye uno de los factores más importantes que configuran el perfil distintivo de la Antártida. En algunos lugares su espesor se aproxima a los cinco kilómetros, a cuyo conocimiento se ha llegado gracias a la técnica de sondas de radar emitidas desde el aire, que nos ha aportado información valiosísima sobre el grosor y características de los distintos estratos. La técnica ha puesto también de manifiesto la existencia de grietas que separan verdaderas corrientes de hielo que avanzan desde el interior hasta las costas. Aunque las grietas se encuentren cubiertas e invisibles, los gráficos obtenidos mediante las sondas de radar descubren sin dificultad la existencia de estas corrientes.

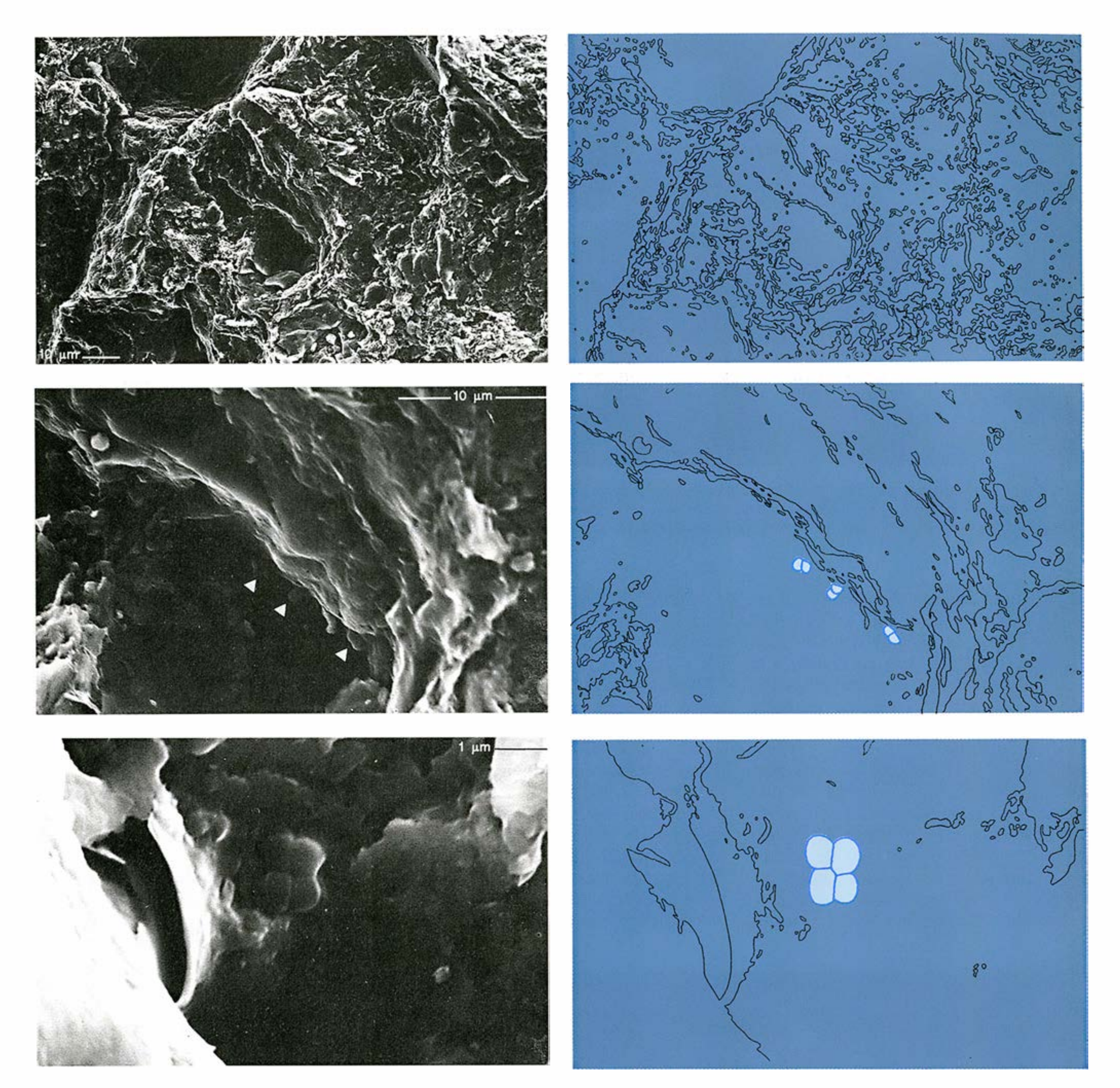
¿Qué secreto se esconde bajo esa corteza pluriestratificada de hielo, intacta durante miles de años? La precipitación que cae de un modo regular en forma de nieve cubre los estratos subyacentes; esta continua sedimentación se acompaña de una compresión de la nieve que se transforma gradualmente en hielo. Los estratos así formados retienen muestras del aire atmosférico junto a micropartículas que se encontraban suspendidas en aquellos momentos. La información histórica almacenada es determinante para el estudio de las características de los gases y partículas contenidas y, por tanto, para descubrir los cambios climáticos y ambientales sucedidos en la Tierra. En este sentido han resultado de gran utilidad las mediciones de CO_2, metano, isótopos de oxígeno y propiedades de las micropartículas retenidas.

El análisis de las microburbujas ha revelado que la concentración atmosférica de CO_2 durante la última glaciación sólo alcanzaba el 60% de los niveles actuales. (Por mor de comparación, el nivel de CO_2 antes de la revolución industrial y la emisión masiva de contaminantes por culpa de la actividad humana no traspasó el 75% de la concentración actual.) Se ha corroborado también el fuerte incremento de metano que se ha ido intensificando con el tiempo: los niveles de metano incluidos en capas de hielo de doscientos años de antigüedad no alcanzan la mitad de la concentración actual. Aunque ese fenómeno carece todavía de una fundada explicación, no puede olvidarse que este gas es uno de los responsables del efecto de invernadero. Asimismo, ha resultado de gran valor el análisis que establece la correlación entre los isótopos de oxígeno ($^{18}O/^{16}O$) y la temperatura de la superficie en el momento de la formación de la capa de hielo. Los estudios obtenidos a partir de estratos de hielo ubicados en las cercanías de la base Vostok, con una antigüedad de 150.000 años, han permitido determinar que el Holoceno actual estuvo precedido de un largo período glacial intercalado entre dos períodos relativamente cálidos.

La existencia de micropartículas cósmicas, polen u otros elementos sólidos conservados en los hielos ha proporcionado una buena fuente de información sobre los regímenes de circulación atmosférica. El análisis del perfil del hielo antártico permite conocer la historia de las pruebas nucleares realizadas por el hombre. Ello demuestra la dispersión planetaria de las nubes radiactivas. Basándose en esta misma estrategia experimental puede afirmarse que los hielos antárticos pueden constituir el procedimiento de referencia, el ajuste a cero, en la detección de contaminantes de síntesis reciente.

De todo ello se desprende que el continente blanco ofrece unas condiciones físicas y climáticas únicas en el planeta. Su aislamiento respecto a los restantes continentes y su extrema dureza ambiental han marcado unas pautas de evolución adaptativa para todos los seres que lo habitan. El estudio de

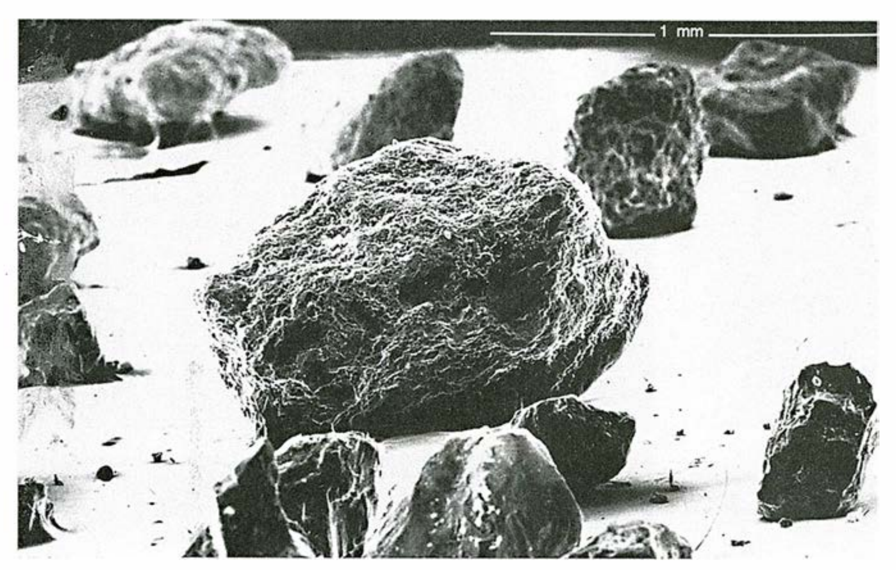
2. DEMOSTRACION DEL CRECIMIENTO BACTERIANO en las partículas de sedimento mediante un experimento sencillo. Se lavan las partículas con suero fisiológico para bacterias (Ringer 1/4) estéril; a continuación, se incuban en un medio de agar-triptona-soja a 15°C durante cuatro días sobre una membrana de tres micras de diámetro de poro. Algunos granos de sedimento presentan un desarrollo bacteriano de fácil identificación, pudiendo incluso quedar englobados por la colonia. La distribución de las colonias presentan una desviación significativa con un aumento considerable de las mismas hacia los granos de sedimento de naturaleza porosa. Obviamente, los granos de cuarzo, de bordes lisos, constituidos por una red cristalina impenetrable no albergan microorganismos endolíticos.



3. MODELO CRIPTOENDOLITICO. Queda evidenciado en las imágenes de aumento progresivo (las flechas señalan la ubicación de las bacterias) obtenidas con microscopía electrónica de barrido. Gracias a esa estrategia adaptativa se mantiene la vida en ambientes inviables. Ante esta intrigante capacidad debe reconocerse que la ausencia de vida en determinados ambientes extremos de la Tierra es sólo aparente.

estas adaptaciones aporta una serie de conocimientos sobre rutas biológicas mal establecidas o ignoradas. La Antártida se ofrece como un gran laboratorio de experimentación de unas características prácticamente irreproducibles; la exposición a la luz solar en períodos alternativos de seis meses constituye el lugar ideal para el estudio de los ritmos de la función clorofílica de las algas planctónicas o de las migraciones verticales del zooplancton que en otras latitudes están conducidas por la sucesión día-noche.

Un ambiente tal requiere unos modelos de seres vivos dotados de una considerable plasticidad fenotípica que les permita sobrevivir y multiplicarse. En este sentido parece clara la existencia de adaptaciones fisiológicas observadas en vegetales y animales. Quizá fuera más correcto hablar de preadaptaciones que proporcionan la plasticidad necesaria para establecerse en ambientes extremos estables. Probablemente las adaptaciones fisiológicas a bajas temperaturas de los vegetales antárticos se ajustan a los mismos mecanismos de que se valen quienes colonizan las zonas árticas y alpinas, aunque parecen más sorprendentes las adaptaciones detectadas en algunos organismos que habitan en ecosistemas antárticos marinos. Es el caso de los peces dotados de adaptaciones enzimáticas que aseguran el nivel metabólico adecuado para mantenerse a bajas temperaturas. En general estas enzimas presentan bajas energías de activación y una gran afinidad hacia el sustrato. Algunos peces antárticos carecen de hemoglobina en sangre. Esta singular propiedad la comparten parcialmente otros peces polares que pueden presentar bajos niveles de hemoglobina, es-



4. GRANOS DE SEDIMENTO INCUBADOS a tiempos variables de 14 a 40 horas, fijados, montados sobre un soporte adhesivo y recubiertos con oro, preparados para una observación al microscopio de barrido. Su naturaleza química es variable en concordancia con una labradorita degenerada.

pecialmente durante el invierno. La rápida solubilización del oxígeno en aguas frías y la elevada concentración de estos elementos han conducido a la eliminación de este pigmento respiratorio. Su ausencia se compensa mediante modificaciones en su sistema circulatorio, el aumento del corazón y vasos sanguíneos y la dotación de una gran red de capilares. Una de las adaptaciones más conocidas es la que consigue un descenso del punto de congelación mediante el aumento de solutos y acumulación de agentes anticongelantes como glicoproteínas y azúcares.

Nuestros estudios en tierras y mares antárticos se han desarrollado en dos lugares distintos: la primera expedición tuvo lugar durante el verano de 1984-85, a bordo del rompehielos argentino "Almirante Irizar" que cubría un extenso itinerario a través del mar de Weddell. Durante su recorrido se llevaron a cabo diversas determinaciones físico-químicas y biológicas del agua (temperatura, salinidad, actividad fitoplanctónica, etc.), tomándose además muestras de sedimentos que serían estudiadas posteriormente en el laboratorio. Las restantes expediciones se han venido realizando en una zona menos extensa cuyo centro geográfico está situado en la base Juan Carlos I, en la isla de Livingston, en el archipiélago de las Shetland del Sur.

Nosotros nos hemos concentrado en el estudio de la adaptación de ciertas bacterias a este ambiente extremo. Llamaba, en primer lugar, la atención que las muestras de sedimento recogidas en el año 1984, a 63° 34' de latitud Sur y 56° 25' de longitud Oeste, a una profundidad de 41 metros y a una distancia de 0,4 millas de la costa, almacenadas constantemente a –35°C, conservaran el mismo número de bacterias, cuando las analizamos en 1991. Las bacterias aisladas no están provistas de endosporas u otros dispositivos estructurales aparentes que proporcionen una especial resistencia.

¿Cómo se explica esta formidable resistencia? ¿Es posible que haya organismos que se mantengan viables durante siete años en condiciones tan extremas?

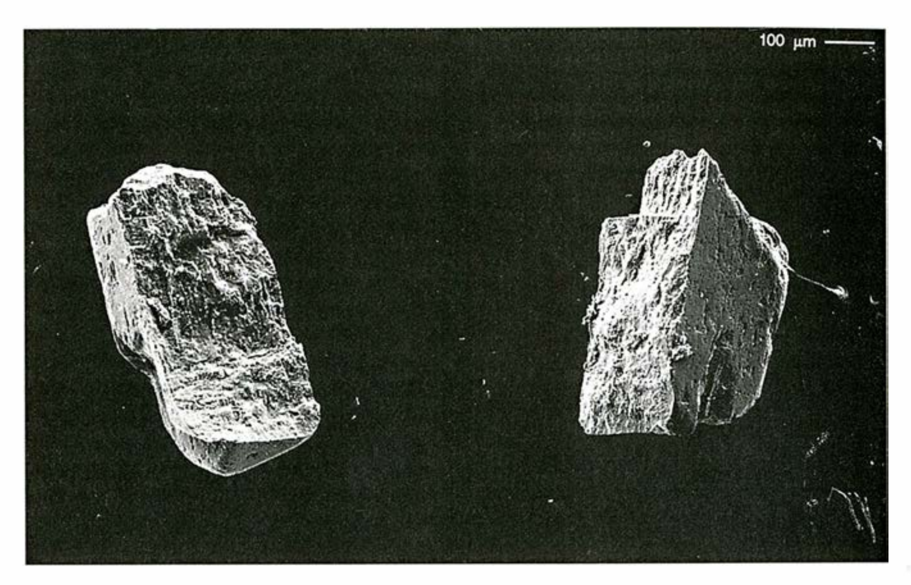
Ciertamente una de las adaptaciones terrestres más intrigantes corresponde a la desarrollada por los seres vivos endolíticos. De ellos se han ocupado E. I. Friedmann y su equipo, de la Universidad de Florida, y H. S. Vishniac (trágicamente fallecido en los hielos antárticos), de la Universidad de Oklahoma. Para ellos, un mecanismo de adaptación, en principio terrestre, como es el endolítico, permite la supervivencia de líquenes, algunas clorofíceas, levaduras y hongos filamentosos, cianobacterias y bacterias qui- miorganotrofas, en el pequeño espacio aéreo que proporcionan algunas rocas.

Friedmann distingue dos modelos fundamentales de organismos endolíticos: los kasmoendolíticos, si colonizan, como en el caso de los líquenes, grietas o fisuras de las rocas, y los criptoendolíticos, si habitan en pequeñas cavidades que existen en algunas rocas enteras o desmenuzadas de textura porosa. Si los colonizadores criptoendolíticos son organismos primarios fotosintéticos, sólo podrían situarse en el interior de las rocas translúcidas. De esta forma y a escasos centímetros de la superficie, pueden recibir la energía luminosa necesaria.

Considerando esta situación, los biólogos hablan de nanoclima, capaz de mantener a organismos procariotas y eucariotas habitantes de pequeñas cavidades facilitadas por la propia estructura de la roca. Es un nicho peculiar que protege y resguarda a sus ocupantes de un ambiente hostil. En varias ocasiones los microconductos que comunican al exterior se encuentran cerrados con material rocoso disperso. Esta situación favorecería la estabilidad del sistema. Las características de

5. BACTERIAS ENDOLITICAS desarrolladas sobre un grano de sedimento. La imagen de microscopía electrónica de barrido corresponde a una de las partículas de la figura que confirma nuestra hipótesis sobre el hábito endolítico de aquéllas. Durante los primeros días de incubación las bacterias se localizan únicamente entre las grietas de los granos de sedimento. La imagen presenta una población de *Planococcus* que constituye el 80% de los microorganismos aislados.

la roca ejercen una influencia importante en las comunidades microbianas colonizadoras. Importa menos su naturaleza química —los microorganismos no penetran por la solubilización de la roca— que su estructura física: porosidad, color y transparencia. Sólo las rocas con grietas y poros facilitan el asentamiento de diversas poblaciones microbianas, alcanzándose incluso una distribución zonal en función de sus posibilidades fisiológicas. Así, los microorganismos endolíticos fotótrofos, al depender de la energía luminosa, sólo colonizan rocas translúcidas a pocos centímetros de su superficie.



6. GRANO DE SEDIMENTO previamente esterilizado con rayos ultravioleta, en plataforma rotatoria, durante una hora y a 11,5 centímetros de distancia del foco emisor. Posteriormente es fracturado y preparado para microscopía electrónica de barrido. Las caras de fractura son evidentes y permitieron localizar a las bacterias en un hábitat de auténtica cripticidad, desde hacía, por lo menos, siete años. Con este procedimiento, que no comprende la incubación, se demostró de un modo riguroso el comportamiento endolítico de las bacterias aisladas.

Nuestro interés por ese modelo biológico, apenas descrito en los tratados de ecología, surge ante la detección de ciertas bacterias que aparecieron incluidas en los pequeños poros de un sedimento tomado en el mar de Weddell, a cuarenta metros de profundidad. En el laboratorio de microbiología de la facultad de farmacia de la Universidad de Barcelona, nos propusimos estudiar dos aspectos de este intrigante problema: a qué clase pertenecían las bacterias que medraban en aquellos lugares y si realmente vivían incluidas en las galerías y microconductos facilitados por la estructura de los pequeños granos de sedimento.

¿Son acaso exclusivas de la Antártida las bacterias aisladas? Posiblemente no. Su perfil taxonómico corresponde a especies poco frecuentes en otras latitudes. La valoración de 138 caracteres morfológicos, estructurales (características de la pared, etc.), fisiológicos (relaciones con el oxígeno y otras caracteres metabólicos), quimiotaxonómicos (composición de lípidos polares, quinonas etc.) y ecológicos (hábitat) ha revelado que en el interior de los granos de sedimento coexisten varios representantes bacterianos quimiorganótrofos, es decir, que se alimentan de sustratos orgánicos.

Mariano Moros, trabajando en el departamento de microbiología de uno de los autores (Guinea), aísla tres especies fácilmente identificables: *Micrococcus roseus*, *Micrococcus luteus* y *Staphylococcus xylosus*. Los restantes aislamientos, tres, son cocos gram-negativos pero con una estructura de envueltas típicamente gram-positiva demostrable al observar cortes al microscopio electrónico de transmisión. Algunos aislamientos se disponen en parejas o cortas cadenas, otros en forma de tétradas. En general manifiestan una escasa o nula capacidad para la utilización de los hidratos de carbono. Su tolerancia al cloruro sódico es variable, pero está comprendida entre el 5% y el 10%. Algunos acumulan pigmentos carotinoideos. Dos aislamientos pertenecen al género *Planococcus* y el restante, muy singular, no tiene una ubicación taxonómica referenciable. Actualmente intentamos descifrar su verdadera identidad junto al equipo de Francisco Ruiz-Berraquero, de la Universidad de Sevilla.

La identificación de los biotipos bacterianos aislados no es ejercicio de mera recreación taxonómica. Veamos el caso de *Planococcus*; si nos apoyamos en el análisis comparativo de las secuencias de nucleótidos del ARN 16 S, procedimiento que establece una relación filogenética entre los organismos procariotas, la situación real de este tipo se alejaría de la familia en la que se encuentra ubicado en la actualidad, Micrococáceas, para formar parte, como género propio, de la familia de las Baciláceas. Este planteamiento puede sorprender incluso a bacteriólogos familiarizados con la taxonomía bacteriana, porque una objeción importante a esta propuesta podría basarse en la incapacidad que tiene *Planococcus* para formar endosporas. A este respecto es adecuado recordar la opinión de algunos especialistas en sistemática bacteriana, que admiten las limitaciones que manifiesta una taxonomía basada exclusivamente en criterios estructurales, subestimando a otros que pueden aportarse desde otras fuentes, como es el caso de la quimiotaxonomía. La consideración de las características de estas bacterias nos conduce a un capítulo incipiente de la taxonomía bacteriana. Probablemente la causa de esta aparente inseguridad en la clasificación de estos organismos no es otra que la escasez de representantes. Hasta hace pocos años algunas descripciones de una especie de *Planococcus* (*P. halophilus*) se apoyaban en la caracterización de un solo ejemplar. En nuestro caso, los ejemplares de *Planococcus* aislados de los sedimentos cercanos a la base argentina de Marambio se encuentran alejados de las dos especies reconocidas en la actualidad: *P. citreus* y *P. halophilus*. Karen J. Miller, de la Universidad de Massachusetts, ha aislado, de lugares antárticos tan distantes del nuestro, como la zona de los Valles Secos, bacterias pertenecientes al género *Planococcus*.

La segunda cuestión que debíamos resolver consistía en la demostración del comportamiento endolítico de las bacterias aisladas que les permite formar comunidades entre los pequeños espacios aéreos que facilitan las rocas. Encontraba apoyo este planteamiento en la siembra de alicuotas del sedimento; mantenido desde diciembre de 1984 a -35°C, en un medio de cultivo convencional para bacterias heterótrofas como el agar de tryptona-soja, aparecen, después de cuatro días de incubación a 15°C, el mismo número de colonias bacterianas, aproximadamente 5000 por gramo de sedimento.

La composición del sedimento, constituido mayoritariamente por elementos oscuros, favorecía nuestra idea. El estudio espectrográfico puso de manifiesto que se trataba de un silicato policatiónico que formaría parte, pro-

bablemente, de una labradorita degenerada. Entre sus componentes abundan elementos dotados de una textura porosa que alternan con otros constituidos por cristales de SiO_2. Además, la determinación de la materia orgánica, expresada en carbono orgánico, del orden del 0,55%, tolera el posible mantenimiento de una flora bacteriana.

La demostración del crecimiento de las bacterias relacionadas con las partículas de sedimento se ha fundamentado en un procedimiento experimental muy sencillo. El método consiste en el traslado de 10 miligramos de sedimento hasta un soporte de filtro Millipore que contiene una membrana de acetato de celulosa de tres micras de diámetro de poro. Las partículas retenidas en el filtro se lavan con 50 ml de Ringer 1/4 estéril. Una vez se ha llevado a cabo la filtración en vacío, la membrana, que retiene sólo los granos de sedimento, se traslada hasta la superficie de una placa de petri de 10 cm de diámetro, que contiene 24 ml de agar-tryptona-soja. A los cuatro días de incubación a 15°C, algunos granos de sedimento retenidos en la membrana presentan un desarrollo bacteriano fácilmente identificable, hasta el extremo de quedar incluidos en el centro de una colonia bacteriana. Curiosamente la situación de las colonias presentaba en todos los casos una desviación significativa hacia los granos de sedimento de naturaleza porosa. Entre las bacterias detectadas, la población mayoritaria correspondía a uno de los biotipos identificados como *Planococcus*.

La consolidación de nuestra hipótesis debía reforzarse mediante observaciones de microscopía óptica y de microscopía electrónica de barrido. La preparación de las muestras de sedimento para microscopía electrónica se obtuvieron a partir de granos preparados e incubados a tiempos variables, 14 h., 24 h., 30 h. y 40 h., y fijados con glutaraldehído al 4% durante una hora a 4°C en tampón fosfatos 0,1 M. Posteriormente, los granos se montan sobre una membrana bioadhesiva y se recubren con oro.

La observación periódica de los granos de sedimento incubados a tiempos distintos mostraron un aumento progresivo de células bacterianas, que durante las primeras horas se localizan únicamente entre las grietas de los granos de sedimento. Sin embargo, a tiempos que corresponden a incubaciones prolongadas, del orden de 30-40 horas, las imágenes señalan un aumento progresivo de células bacterianas hasta formar auténticos tapices que acaban englobando al grano de sedimento.

Con todo, aun se podía garantizar el comportamiento endolítico de las bacterias aisladas utilizando otra estratagema experimental que descartase un fenómeno de adsorción microbiana a la superficie de los pequeños granos de sedimento. Así, optamos por llevar a cabo la esterilización externa de los granos de sedimento mediante la irradiación con rayos ultravioleta, de alicuotas de 10 miligramos de sedimento colocadas en placas de petri de 10 centímetros de diámetro situadas en una plataforma oscilante que asegurase la rotación completa de cada grano durante una hora de exposición a 11,5 centímetros de distancia. En todos los casos, la incubación de los granos irradiados reproducía los mismos resultados: los componentes procedentes del sedimento antártico conservaban el mismo número de microorganismos endolíticos.

Pero el experimento decisivo que corroborara sin ambages el modelo endolítico implicaba que, tras la rotura mecánica de un grano de sedimento, pudieran localizarse elementos bacterianos incrustados entre su estructura porosa. A este respecto nos planteamos dos posibilidades técnicas: fragmentar el grano y someterlo posteriormente a su recubrimiento metálico o bien recubrir en primer lugar el grano con aluminio, fragmentarlo y someterlo posteriormente a un segundo recubrimiento, esta vez con oro. La localización interna de una bacteria metalizada en oro reivindicaría la localización interna de la bacteria. Los dispositivos analíticos de los microscopios electrónicos de barrido permitían una rápida identificación del metal que recubría la zona del grano sometida a su observación y análisis. La realidad hizo innecesaria la aplicación de esta sugerente argucia experimental, ante las excelentes fracturas conseguidas por el equipo de microscopía electrónica de la Universidad de Barcelona. En efecto, con fracturas resueltas en dos unidades, la prospección de la zona interna de un grano de sedimento garantizaba la auténtica situación de una bacteria. En este caso la fortuna nos ayudó a la rápida localización de bacterias que permanecían en una situación de auténtica cripticidad, al menos, durante siete años.

¿Cuál es el significado adaptativo del modelo criptoendolítico? Se trata, sin duda, de una forma de organización que ha presentado la solución para que algunos microorganismos mantengan su viabilidad en un ambiente externo inviable. Es una forma de vivir que ha pasado inadvertida para la mayoría de observadores y no pocos científicos. Hace solamente unos años creíase que los Valles Secos eran prácticamente estériles, y hasta llegó a asociarse el medio antártico con el ambiente marciano.

Esta visión constituía un planteamiento poco riguroso, porque ignoraba la existencia de vida bajo la superficie de suelos sometidos a temperaturas muy inferiores a los 0°C. En efecto, cabía considerar una interesante productividad primaria desarrollada por clorofíceas y cianobacterias criptoendolíticas; estos microorganismos, psicrófilos (es decir, capaces de multiplicarse a bajas temperaturas) se alojaban a un par de milímetros de la superficie, en la zona de paso de luz. Además, esos organismos fotótrofos coexistían con otros grupos de microorganismos quimioheterótrofos, como levaduras, hongos filamentosos y bacterias. Este singular ecosistema permite llevar a cabo cierta actividad metabólica mediante una combinación adecuada de temperatura y humedad. En un ambiente así la fuente de nutrientes es suficiente, si se pondera su lenta utilización. A este respecto el grupo de Imre E. Friedmann ha señalado una curiosa convergencia morfológica y fisiológica entre algunas algas endolíticas de la Antártida y otras aisladas de lugares tan tórridos como el Negev o el Sinaí. Se trata de organismos adaptados a temperaturas extremas (altas o bajas) y una escasa biodisponibilidad de agua.

Este ambiente de intenso frío, generador de tantos procesos vitales para la economía de la Tierra, es, como vemos, un celoso guardián de informaciones pretéritas que incrementan el conocimiento y ayudan al científico a una mejor comprensión de los procesos evolutivos naturales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVIDENCE OF AN INDIGENOUS MICROBIOTA (YEAST) IN DRY VALLEYS OF ANTARCTICA. H. S. Vishniac y W. P. Hempling en *Journal of General Microbiology* 112, págs. 301-314; 1979.

ENDOLITHIC MICROORGANISMS IN THE ANTARTIC COLD DESERT. E. Friedmann, Imre. *Science* 215, págs. 1045-1053; 1982.

ESTUDIO DE LA DINAMICA Y COMPOSICION DE LAS AGUAS ANTARTICAS. J. Castellví, J. R. Zavatti, R. Massol y A. Ballester. Actas del I Symposium de Estudios Antárticos. 1986.

MICROORGANISMOS ENDOLITICOS: MODELO DE ADAPTACION A LA SUPERVIVENCIA EN AMBIENTES EXTREMOS. J. Guinea. *Microbiología 1990.* Ed. J. Casadesús y F. Ruiz-Berraquero. Manuales Universitarios. Serv. Pub. Universidad de Sevilla. Sevilla; 1990.

El pavo de matorral

Esta ave australiana pertenece a una familia que construye montículos para incubar los huevos. El proceso es fruto de un cúmulo de adaptaciones por parte del huevo y del polluelo

Roger S. Seymour

En Australia e islas del Indopacífico circundantes vive un grupo de aves cuyo carácter insólito resulta incluso tal para los estándares exóticos de la fauna de la región. Las hembras no se aposentan sobre los huevos para empollarlos; antes bien, ponen los huevos en lugares donde fuentes externas proporcionan calor para la incubación. Algunas especies de las islas tropicales entierran sus huevos en arena caldeada por el sol o por la actividad geotérmica, mientras que otras construyen montones de hojarasca vegetal (por lo que reciben el nombre de constructores de montículos) en los que la energía procedente de la descomposición bacteriana mantiene elevada la temperatura.

Las 19 especies de esta familia de aves, llamada Megapódidos en razón del gran tamaño de sus pies, prestan tan poca atención a la crianza del polluelo como a su incubación. A diferencia de los solícitos padres del pollo de pinzón o de zorzal, los progenitores megápodos no cuidan ni alimentan a sus hijos recién salidos del huevo.

Para conseguir su independencia precoz, huevos y pollos de megápodos poseen características especiales. Un diseño simpar permite que el huevo se desarrolle en el montículo, un ambiente que sería fatal para los embriones de la mayoría de las aves. Y los pollos de megápodos emergen no sólo con una capacidad respiratoria distinta de la que define a la mayoría de las aves, sino con un vigor y una capacidad de alimentación precoces.

La investigación reciente sobre una de las especies de verdaderos constructores de montículos que viven en los bosques tropicales y subtropicales, el pavo de matorral australiano (*Alectura lathami*), nos proporciona un mayor conocimiento de las propiedades del montículo, el huevo y el pollo de los megápodos. Con la ayuda de mis colegas David y Carol M. Vleck, David Bradford, David T. Booth y Dominic Williams, he examinado la regulación de la temperatura del montículo, los mecanismos de intercambio de gases de los huevos y de los microorganismos de ese habitáculo, la energía del desarrollo embrionario y el fenómeno de la sorprendente transición biológica que tiene lugar durante la eclosión. Estos estudios continúan una línea iniciada hace 35 años, cuando H. J. Frith abordó la biología de la reproducción del faisán australiano (*Leipoa ocellata*), uno de los amontonadores de mantillo más famosos.

El ritual distintivo de la pareja progenitora de pavos de matorral comienza en los meses de invierno, época en la que el macho recolecta hojarasca (constituida por hojas, ramitas y musgo) y la apelmaza junto a la maleza o protegida bajo la bóveda forestal, hasta que la hacina mide cosa de un metro de altura y cinco metros de diámetro. El pavo de matorral revuelve luego el material y lo desmenuza excavando agujeros en la cima del montón y rellenándolos. Transcurridas escasas semanas, el montículo se ha transformado en un mantillo bastante fino, deleznable, cubierto por una capa de palos y ramitas mayores.

Los hongos, que provocan la des-

ROGER S. SEYMOUR es catedrático de zoología en la Universidad sudaustraliana de Adelaida. En 1972 se doctoró en zoología por la Universidad de California en Los Angeles. Se marchó luego a Australia, donde ha venido estudiando la fisiología respiratoria y cardiovascular de animales insólitos (serpientes marinas, cocodrilos), o de los huevos, no menos raros, de ranas de desarrollo terrestre y de aves constructoras de montículos.



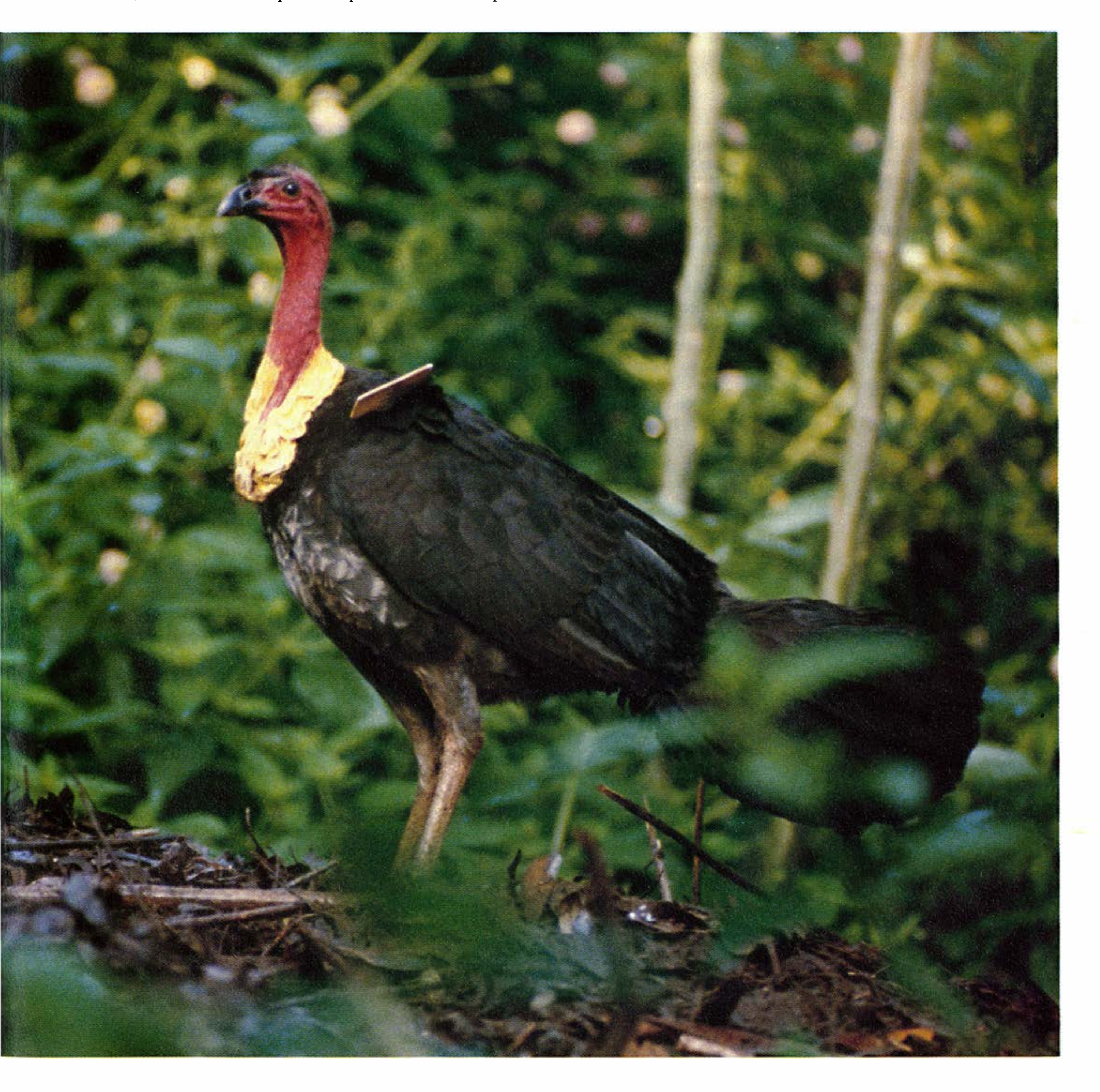
1. PAVO DE MATORRAL, de los bosques tropicales y subtropicales de Australia. El macho adulto (que aquí se ilustra con una plaquita de identificación en su hombro) construye montículos para incubar los huevos de su pareja.

composición de la hojarasca, producen el calor que incubará los huevos. Después de un período inicial en el que la temperatura del montículo varía a tenor de las fases biológicas de los microorganismos, la temperatura reinante a unos 60 centímetros, profundidad en la que se colocarán los huevos, se estabiliza alrededor de los 33 grados Celsius. La temperatura de incubación permanece constante, dentro de un rango de uno o dos grados, a lo largo de toda la estación de reproducción.

Mientras el macho construye el montículo, la hembra se dedica a comer, alimentándose para la puesta. Una vez está listo nido tan singular, la pava pone un huevo cada tres días aproximadamente durante cinco a siete meses. Lo deposita en una trinchera en forma de cuña que ella misma excava. Dado que el montículo sirve de incubador continuo, unos huevos se desarrollarán y harán eclosión al tiempo que otros son puestos. Pueden llegar a coincidir hasta 16 huevos en un montículo de esos.

Hemos preparado montículos artificiales y trabajado con hacinas naturales para así determinar los factores que conducen a la estabilidad térmica. Esos experimentos nos han enseñado que el tamaño del montículo constituye un factor decisivo. Por citar un ejemplo: en la isla sudaustraliana de Kangaroo los pavos de matorral construyen montículos de unas 6,8 toneladas de peso y 12 metros cúbicos de volumen. Tales hacinas gozan de una gran inercia térmica y apenas si se resienten de los cambios diarios de temperatura externa.

El montículo funciona también como un termostato. La temperatura del centro depende del balance entre la tasa de producción calorífica microbiana y la tasa de pérdida calórica del montón. Medimos la tasa de consumo

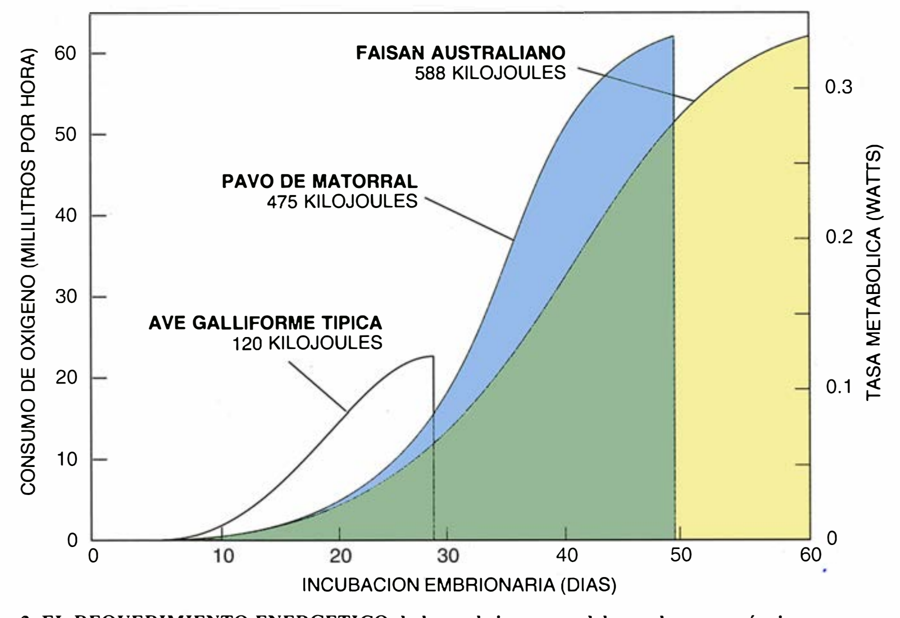




2. MONTICULO DE INCUBACION, compuesto por hojarasca de bosque seca que ocupa bastante espacio aéreo. Los montículos de la isla Kangaroo, en aguas de Australia del Sur, tienen por término medio un peso de 6,8 toneladas y un volumen de 12 metros cúbicos.

microbiano de oxígeno, indicador de la tasa de producción calorífica, y observamos que aumentaba de forma exponencial con la temperatura del montículo. La pérdida de calor se avivaba, asimismo, con la temperatura de la hacina, pero de manera más acusada. Si dibujamos en un gráfico ambos crecimientos —el de la producción y el de la pérdida de calor—, observaremos que las rectas que los simbolizan se cortan. El punto de intersección señala la temperatura estable, aquélla en que la pérdida de calor iguala a la producción del mismo.

La temperatura del montículo tiende siempre a bajar o a subir hacia esta temperatura de equilibrio. A temperaturas en el centro de la hacina por debajo del equilibrio, se crea más calor que se pierde y se caldea el lugar. Si éste se enfría cuando lo abre el macho para comprobar la temperatura o cuando la hembra pone allí otro huevo, tornará a calentarse tras taparlo de nuevo. Y, si la temperatura del mismo supera la cota de equilibrio, se enfriará porque la pérdida de calor excede su producción.



3. EL REQUERIMIENTO ENERGETICO de los embriones que deben valerse por sí mismos, como el faisán australiano (*derecha*) y el pavo de matorral (*centro*), es mayor que los de las aves galliformes (*izquierda*), cuyos progenitores cuidan de ellos. Las áreas definidas por cada curva representan el requerimiento energético del embrión en kilojoules. Las curvas indican consumo de oxígeno y un parámetro dependiente, la tasa metabólica, desde la puesta hasta la eclosión.

Aunque la homeotermia del montículo mantendrá una temperatura estable, la temperatura apropiada para la incubación la establecen las aves. El macho comprueba la temperatura insertando su pico, de cerca de tres centímetros de longitud, en el material del montículo durante las excavaciones. Si la temperatura del interior es baja, el ave añade a la hacina una pequeña cantidad de mantillo fresco. Esta acción proporciona nutrientes a los microorganismos y aumenta el nivel de producción de calor. También agranda ligeramente el montículo, con lo que reduce la tasa de pérdida de calor. Se trata de un proceso que exige refinada precisión: un centímetro de material fresco añadido a la hacina puede incrementar la temperatura del montículo alrededor de un grado y medio C.

Una vez el montículo está construido y la temperatura se ha estabilizado, las aves no necesitan esforzarse mucho para mantener la temperatura. La verdad es que la persistencia de ese nivel hace que algunos montículos abandonados mantengan temperaturas favorables a la incubación durante cerca de seis meses.

La retención de calor se ve favorecida por otras peculiaridades del montículo. De ordinario, el nuevo montículo se sitúa sobre los restos de otro anterior, que lo aísla del suelo. Además, la conductividad térmica del mantillo es de unos 2,4 miliwatts por centímetro por grado C, más baja que la de la arena seca. La baja conductividad, que resulta de la sequedad del montículo (que sólo contiene 30 mililitros de agua por 100 gramos de material sólido), evita la pérdida de calor.

Aun cuando el montículo fuera más húmedo, la temperatura de incubación podría mantenerse con mayores tasas de producción y pérdida de calor; bastaría con recoger más hojas y ramitas. Los montículos producen una cantidad mínima de calor, de 100 a 200 watts, y la energía de la hojarasca dura varios meses.

Los pavos de matorral pueden conseguir que el tiempo atmosférico trabaje en su provecho. Hace más de 50 años, David H. Fleay, naturalista australiano, sugirió que los pavos podían controlar la entrada de lluvia modificando la forma del montículo: mantenían la cima abombada si el material estaba húmedo y creaban un cráter si se necesitaba agua. Nuestras observaciones lo confirman.

La regulación precisa del intercambio de gases corre paralela a la regu-

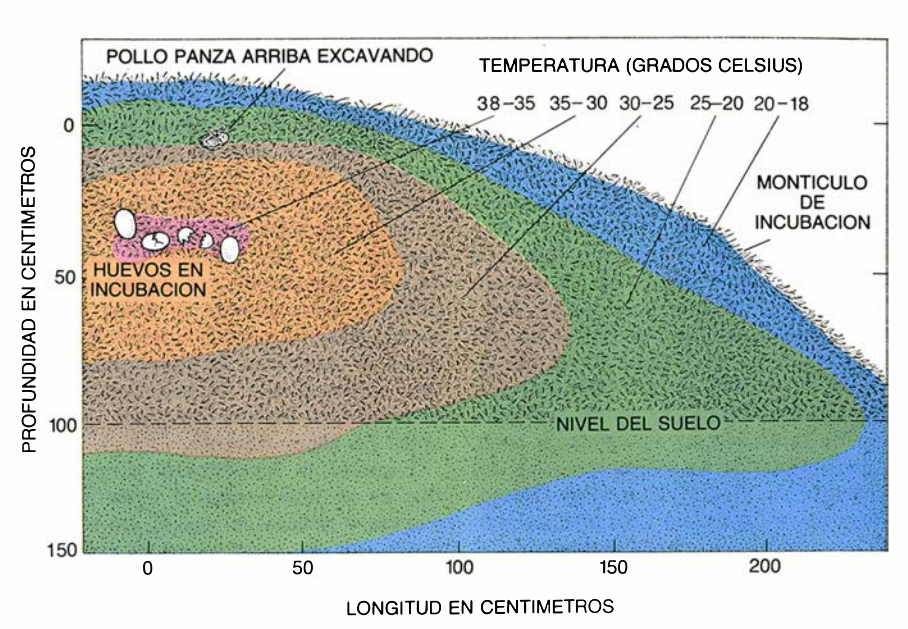
lación de temperatura del montículo, finamente sincronizada. Algunos atribuyen el calor microbiano reinante en el habitáculo a la fermentación; pero mi propia investigación señala otro origen: la respiración aerobia. Los microorganismos consumen oxígeno a razón de unos 20 litros por hora, que es una tasa 60 veces superior a la del consumo por parte de todos los huevos del montón. Se va suministrando oxígeno a medida que la atmósfera se difunde por entre los poros abiertos de la hojarasca. Estos espacios ocupan alrededor del 70 por ciento del volumen de la hacina.

Mantener un contenido bajo en agua maximiza el espacio aéreo y asegura que los niveles de oxígeno en la proximidad de los huevos no bajen demasiado, ni suban desmesuradamente los niveles de dióxido de carbono. No obstante, el contenido de oxígeno del montículo se reduce desde el 21 por ciento en la superficie hasta alrededor del 17 por ciento en el entorno de los huevos; los niveles de dióxido de carbono suben del 0 al 4 por ciento.

Estos niveles gaseosos supondrían una carga para el animal, si no fuera por la estructura de los huevos de megapódido. A igualdad de talla, su cascarón tiene aproximadamente la mitad de espesor del cascarón de un huevo de ave comparable. Esa fina envoltura fomenta la permeabilidad, al acortarse la distancia que el gas debe recorrer en su difusión.

David Booth y el autor descubrieron que el embrión en desarrollo disolvía el cascarón, y eliminaba así la parte más angosta y restrictiva de los poros del cascarón, que se ahúsan a medida que se acercan a la pared interna. En virtud de ese proceso, la permeabilidad del cascarón a los gases triplica la que se conoce en la mayoría de los huevos de ave. El aumento de permeabilidad compensa, casi por entero, los niveles gaseosos anómalos en el montículo y expone al embrión encerrado en la cáscara a niveles de oxígeno y de dióxido de carbono que se encuentran dentro del rango que soportan los embriones de la mayoría de las aves.

Pero abrigarse en cascarón tan fino podría comportarle riesgos. El seguimiento de la tasa de mortalidad en la etapa de huevo de aves envenenadas con DDT ha demostrado que un progenitor que empolla puede romper fácilmente un cascarón delgado. En el montículo encuentran los megápodos una defensa imponente contra ese tipo de rotura. Nos hemos llegado a poner de pie sobre un montículo donde había, a sólo 10 centímetros de profundidad, huevos de pavo de matorral y no los hemos roto.



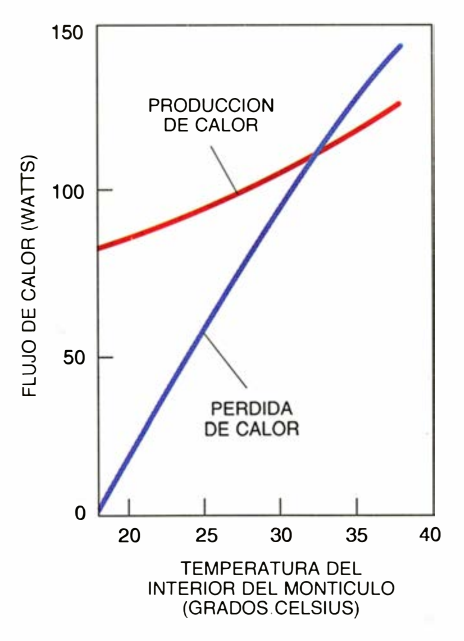
4. SECCION TRANSVERSAL de un montículo; muestra que la región más cálida se encuentra a unos 60 centímetros de profundidad. La respiración de microorganismos y embriones reduce los niveles de oxígeno y aumenta los de dióxido de carbono alrededor de los huevos.

Los huevos del pavo de matorral difieren de los demás huevos aviares en lo que respecta a la conservación del agua. El malogrado Hermann Rahn, de la Universidad estatal de Nueva York en Buffalo, Amos Ar, de la Universidad de Tel Aviv, y sus colaboradores han demostrado que, durante la incubación, la mayoría de los huevos de ave pierden, en promedio y por evaporación, el 18 por ciento de su peso inicial. En el momento de la puesta, el huevo recibe cierta cantidad de agua, amén de la cuantía metabólica obtenida por el catabolismo, o degradación, sobre todo de lípidos en el vitelo. El presupuesto hídrico se va consumiendo de suerte que se pierda muy poca agua líquida durante la eclosión.

En cambio, los huevos de pavo de matorral se incuban en una humedad elevada. Pierden sólo el 9,5 por ciento de su agua por evaporación, a pesar de un período de incubación de 49 días, es decir, 20 días más que el de otras aves de tamaño equiparable. Las altas tasas metabólicas de ese largo período de incubación producen abundante agua metabólica, el equivalente a un 7 por ciento del peso inicial del huevo. Así, los huevos del pavo de matorral pierden alrededor de 25 mililitros de agua excedentaria cuando emergen del huevo.

Nos sorprendió comprobar que los huevos evaporaban tanta agua, habida cuenta de la humedad relativa en el montículo (superior al 99 por ciento). Medimos la permeabilidad de la cáscara, con la esperanza de hallar en el huevo pérdidas en torno al 0,1 por ciento de su peso inicial; descubrimos, por contra, que perdía cerca del 10 por ciento. La discrepancia profunda entre lo esperado y lo observado debíase a tres factores, específicos, una vez más, de los huevos de megápodo.

El factor más importante es el calor metabólico producido por el embrión en un ambiente de notable aislamiento. Durante la incubación, este calor eleva paulatinamente la temperatura del huevo desde 33 hasta 38 grados C, lo que implica multiplicar por cuarenta el gradiente de presión del vapor de agua



5. TEMPERATURA DE EQUILIBRIO en el montículo. Se alcanza en el punto de intersección, cuando la producción de calor iguala a la pérdida del mismo.

a través de la cáscara. Nuestras mediciones fueron confirmadas por Ralph A. Ackerman y Richard C. Seagrave, de la Universidad estatal de Iowa, quienes trabajaron con modelos matemáticos de los flujos de calor y de agua en huevos de megápodo enterrados.

El segundo factor que promueve la pérdida de agua estriba en la manera en que ésta abandona el huevo: atraviesa, por acción capilar, los poros del cascarón y no se evapora hasta que alcanza la superficie del cascarón. Ese movimiento observado acorta la distancia de difusión para el vapor de agua, cuadruplicando la permeabilidad del cascarón a dicho vapor. Por último, la permeabilidad del cascarón aumenta en un 50 por ciento al absorber el embrión en desarrollo calcio de la cáscara.

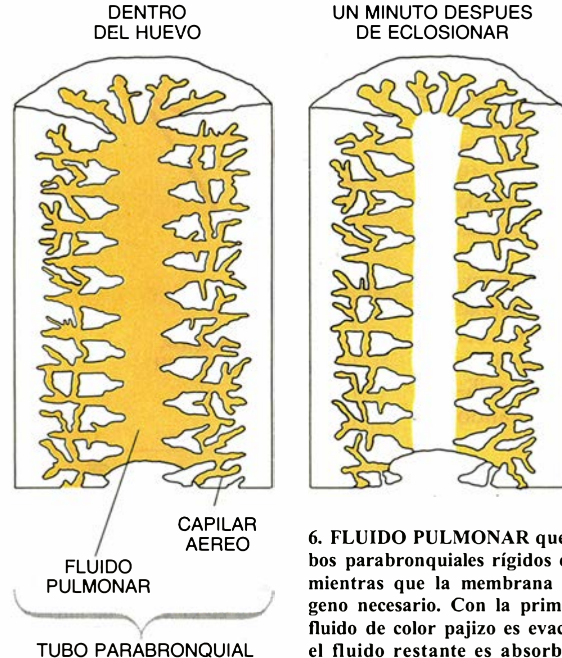
Las características excepcionales de la reproducción de los megápodos no se limitan a las peculiaridades del montículo y del huevo. El propio proceso de desarrollo respiratorio del embrión difiere del que hallamos en la mayoría de las aves. Los embriones de las aves intercambian oxígeno y dióxido de carbono con el medio a través de un órgano respiratorio especial, el corioalantoides. Se trata de una estructura en doble membrana desarrollada por el embrión; crece desde la región umbilical hacia la cáscara. Cuando ha transcurrido aproximadamente la mitad del período de incubación, el corioalantoides rodea al embrión, que continuamente le está suministrando sangre. El embrión termina el desarrollo dentro de su órgano de intercambio de gases, una situación semejante a vivir en el interior de su propio pulmón.

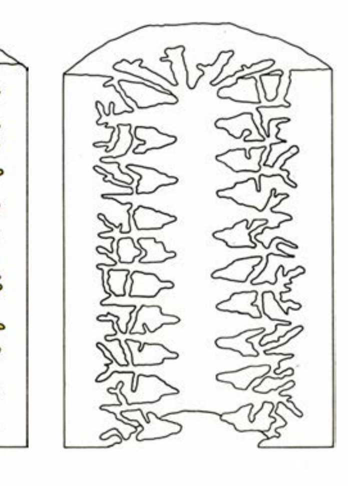
Por ello, el ave se enfrenta a un problema potencial en el momento de hacer eclosión: para salir del huevo se le exige un sobreesfuerzo y, en consecuencia, una gran cantidad de oxígeno. Mas al abandonar ese caparazón, el polluelo debe destruir su única fuente de oxígeno: el corioalantoides. Ese dilema lo resuelven la mayoría de las aves desarrollando los pulmones, intercambiadores eficaces de gases, mucho antes de hacer eclosión.

Durante la incubación, el espacio que en el huevo deja el agua que se evapora se rellena de aire. El gas se acumula por lo general en el extremo romo del huevo, en un compartimento donde las membranas situadas en el interior inmediato de la cáscara se separan para encerrar el aire. Esta cámara de aire, manifiesta en los huevos de gallina hervidos y duros, aumenta de tamaño a medida que se pierde agua en el decurso del desarrollo. La bolsa de aire es esencial en los huevos normales porque, cerca del final de la incubación, el pollo clava su pico en dicha cámara y empieza a ventilar sus pulmones. A esta actividad se la denomina piada interna; es seguida varias horas después por la piada externa, cuando el pollo rompe el cascarón en un punto y empieza a respirar el aire externo. Unas cuantas horas después se produce la eclosión.

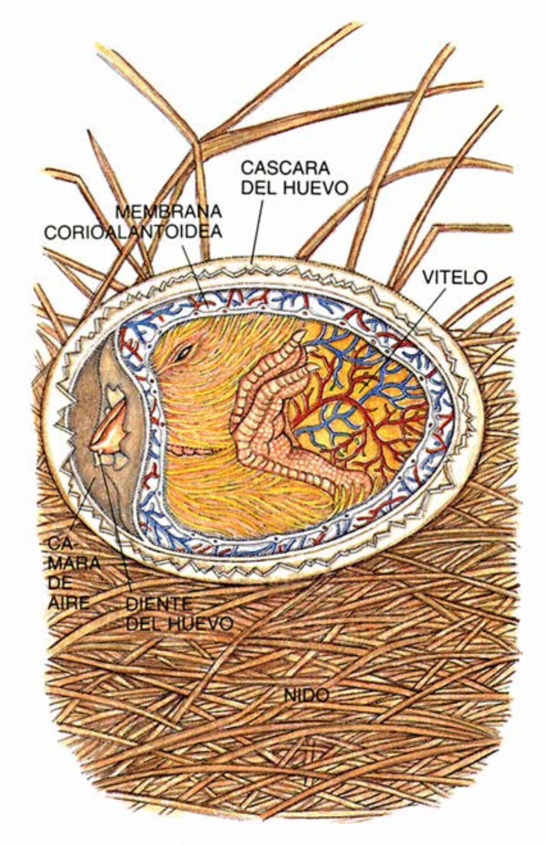
La respiración pulmonar progresa con lentitud, a lo largo del día. Lo ha demostrado A. H. J. Visschedijk, de la Universidad de Utrecht, con pollos de gallina. Mientras tanto, la circulación del corioalantoides se reduce gradualmente hasta que, a la eclosión, ha cesado de funcionar. El pollo puede ya abrirse paso a través del corioalantoides sin peligro de pérdida de sangre. El desarrollo de la función pulmonar asegura la aportación de oxígeno suficiente para satisfacer los requerimientos metabólicos de la eclosión.

La aireación en los pulmones de los recién nacidos constituye un proceso lento por culpa de la estructura del pulmón de las aves. El ejercicio pleno de la función pulmonar depende de la llegada de aire hasta la zona del pulmón que intercambia gases. Pero, a diferencia de los mamíferos neonatos, que pueden expandir sus pulmones e inspirar suficiente gas en los alvéolos para satisfacer los requerimientos energéticos al nacer, las aves no pueden expandir y contraer sus pulmones. Constan estos últimos de los parabronquios, una serie de túbulos que residen en cavidades pulmonares de volumen fijo. El aire llega a los parabronquios insuflado desde varios sacos aéreos hinchables, que operan a modo de fuelles en el interior del cuerpo del animal. El intercambio de oxígeno y de dióxido de carbono acontece, de ma-

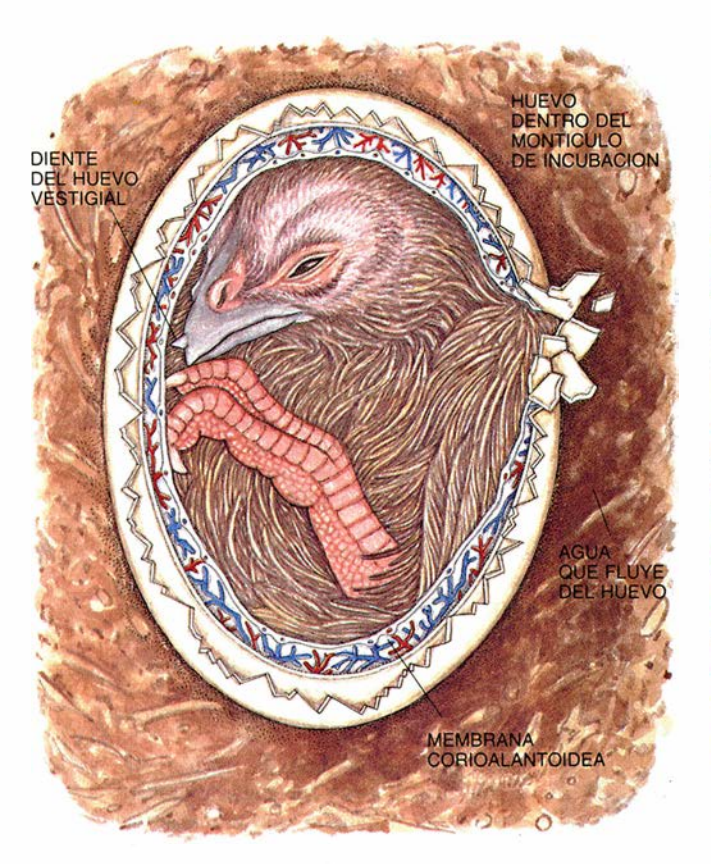




6. FLUIDO PULMONAR que llena los capilares aéreos de los tubos parabronquiales rígidos de los embriones de ave (*izquierda*), mientras que la membrana corioalantoidea proporciona el oxígeno necesario. Con la primera respiración del pollo, parte del fluido de color pajizo es evacuado (*centro*). Al cabo de un día, el fluido restante es absorbido en la sangre (*derecha*).



7. EMBRION DE POLLO; respira en la cámara de aire después de perforar el corioalantoides.





8. ECLOSION DE UN POLLO de pavo de matorral, que se libra de la cáscara empujándola con los hombros (*izquierda*). La cáscara es más delgada que la de la mayoría de los huevos de aves y carece de cámara de aire. El pollo se abre paso excavando el montículo (*derecha*) con sus pies.

nera casi única, en los microcapilares aéreos y ciegos que se hallan conectados a los parabronquios.

Antes de que los pulmones embrionarios entren en funcionamiento, debe achicarse el fluido que los inunda. Mientras el mamífero neonato va saliendo del seno materno, saca la cabeza y toma sus primeras boqueadas, buena parte de ese fluido desaparece a los pocos minutos o segundos mediante cambios en el volumen pulmonar. Queda algo de fluido en los alvéolos, pero se ha perdido el suficiente para satisfacer las necesidades de oxígeno del recién nacido en reposo.

¿Qué ocurre en las aves? El fluido que hay en el pulmón de volumen constante sólo puede eliminarse mediante absorción por la corriente sanguínea pulmonar, proceso que dura muchas horas. Por citar un ejemplo: los pulmones del polluelo de gallina necesitan un día largo de aireación progresiva antes de eclosionar. Transcurrido ese lapso, el volumen de aire alcanza el 44 por ciento del volumen pulmonar total, que es de alrededor de dos tercios del valor del adulto.

Los pavos de matorral, y probablemente también otros megápodos, son las excepciones de esta regla de desarrollo respiratorio. No hay apenas superposición en el cambio de la respiración corioalantoidea a la pulmonar, una transición lenta que se había pensado que era universal en las aves. Su pulmón se halla exento de aire antes de la eclosión. Las membranas de la cáscara del huevo de los megápodos no están adaptadas para formar una cámara de aire en un extremo: el polluelo de megápodo no tiene sitio para respirar en el interior del huevo.

Por eso, comienza a respirar en cuanto eclosiona. El polluelo se libera presionando hacia delante con las patas y hacia atrás con el dorso, hasta que el cascarón cede. Se vale de los pies para rajar largas hendiduras en el corioalantoides; al contraerse la musculatura lisa y empezar a respirar el pollo, queda suspendido el flujo sanguíneo en esa membrana.

Los pollos de megapódidos salen cómodamente del huevo, sin previo desarrollo de la función pulmonar, porque la eclosión no les exige particular esfuerzo. A diferencia de los avestruces y otras aves parecidas, que tardan hasta dos días en librarse de un cascarón grueso, el megápodo rompe de manera expeditiva su envoltura insólitamente fina. Según se aprecia, hay suficiente intercambio gaseoso después de las primeras inspiraciones para mantener vivo al polluelo, aunque quizá no baste ese nivel de intercambio para realizar esfuerzos de inmediato. Los pavos de matorral descansan varias horas después de hacer eclosión, mientras sus pulmones se airean.

Requiere poca energía liberarse del huevo. Pero salir del montículo excavando es harina de otro costal. Los pavos de matorral hacen eclosión a unos 60 centímetros de profundidad; deben emerger del cobijo por sí solos, sin ayuda del progenitor. Hemos observado esa estrategia en un montículo creado a tal efecto en el laboratorio (mantenido dentro de columnas de plástico): los polluelos excavaban el techo para abrirse paso. Acurrucado en decúbito supino, el polluelo emplea sus pies para arañar el techo de la cavidad; las pellas desprendidas se arremolinan en torno a su cuerpo, y él las va apelmazando con el dorso. Los turnos de excavación se interrumpen con largos períodos de respiración profunda. A los dos días y medio, el polluelo merodea ya libre. Las medidas tomadas del consumo de energía durante ese tiempo cifran el coste energético en un tercio aproximadamente del que se ha gastado durante los 49 días de incubación precedentes.

La carencia de cuidados paternos hace necesaria la completa independencia del pollo. Se ha dicho que los



9. POLLO DE PAVO DE MATORRAL, que emerge con las plumas remeras completas, presto para valerse por sí mismo. Este pollo y un huevo que todavía no había hecho eclosión fueron encontrados durante la excavación de un montículo.

megápodos recién eclosionados son superprecoces: salen del huevo con las plumas remeras completas y algunos incluso pueden volar en su primer día. En mi laboratorio Booth demostró que los pavos de matorral y los faisanes australianos no precisan ser empollados porque, inmediatamente después de que su plumaje se seca, mantienen constante la temperatura corporal en un rango de ambientes entre cinco y 45 grados C.

La excepcional madurez en el momento de la eclosión está acompañada por una gran inversión de energía en los huevos y una prolongada incubación. Cabría esperar que los adultos de pavo de matorral, que pesan unos 1800 gramos, pusieran huevos de 60 gramos si guardaran la razón de otras especies de su mismo orden, los Galliformes. Pero pesan 180 gramos, la décima parte del peso corporal del adulto. Las hembras precisan de dos a cinco días para formar huevos tan grandes, en vez del día, o par de días, que necesita la mayoría de las demás aves. El vitelo rico en energía ocupa el 50 por cien del huevo; en otras especies precoces comprende el 40 por cien, y alrededor del 20 por cien en especies no precoces (loros y pelícanos, por ejemplo). De acuerdo con las medidas de consumo embrionario de oxígeno que realizamos, la cantidad total de energía invertida en el desarrollo viene a cuadruplicar la esperada en gallináceas de tamaño similar.

A primera vista, enterrar los huevos y dejar que se incuben solos parece proceder connatural de los reptiles; y lo corroboran ciertos crocodilios, así el cocodrilo marino (*Crocodylus porosus*), que construyen montículos de vegetación y depositan sus puestas en el interior. Pero aunque hubo un tiempo en que se reputó lastre de primitivismo la formación de montículos por los megapódidos, hoy se admite que esa estrategia deriva del comportamiento usual de incubación de las aves.

Respaldan esa idea el diente del huevo y los músculos de eclosión de la nuca que presentan los polluelos de megápodos, aunque no los utilizan. El diente del huevo es un cono calcáreo en la punta del pico, del que se valen muchísimos pollos para perforar el cascarón. Los músculos tiran de la cabeza hacia atrás durante la eclosión para que el diente percutor raje la cáscara. En los megápodos, estas estructuras parecen ser vestigios de aves ancestrales, que sí las necesitarían para librarse de una envoltura más dura y se incubarían al calor del progenitor.

H. J. Frith, naturalista australiano, sugirió una posible secuencia evolutiva desde aves tropicales que anidaban en el suelo y empollaban sus huevos hasta aves que construyen montículos. De acuerdo con su hipótesis, el cálido ambiente tropical donde surgieron probablemente los megápodos ancestrales permitía largas ausencias de los padres; cuando se alejaban del nido, los progenitores podían haber cubierto los huevos con tierra u hojarasca para ocultarlos y ayudar a retener calor. Si las aves escogían lugares caldeados de forma natural por el sol o por vulcanismo, podían permanecer alejadas de los huevos por períodos mucho más largos, tendencia que habría culminado en el abandono total.

Ahora bien, los huevos tenían que hallarse abastecidos de energía y nutrientes suficientes para producir un pollo que fuera capaz de sobrevivir sin la asistencia paterna. De ahí que la selección primara los huevos grandes y ricos en energía. Liberadas del nido, las hembras aumentaron el tiempo de alimentación, lo que podía proporcionar la energía y los nutrientes precisos para producir tales huevos.

A medida que las aves invadieron regiones más frías, como las tierras altas de las islas oceánicas o los bosques templados de Australia, debió de necesitarse más hojarasca para mantener calientes los huevos durante la ausencia de los padres. Es fácil imaginar que la descomposición de la hojarasca aportaría calor a los huevos, y que esto abrió el camino hacia una ulterior invasión de hábitats más fríos. Por lo

que podemos determinar, no existen depredadores indígenas que desbaraten el montículo y devoren los huevos.

Una vez la incubación asegurada no precisó de la supervisión paterna, los adultos se vieron libres para producir numerosos juveniles completamente independientes. En una estación, con recursos abundantes, la hembra de pavo de matorral pone hasta 50 huevos, que en total pesan nueve kilogramos. Considerando la longitud del tiempo de incubación y los tres días que abarca el intervalo de puesta, resulta que un ave de 1800 gramos no podría incubar empollándolos ni siquiera la puesta promedio de 16 huevos que hay en un montículo.

En su alta fecundidad reside, a buen seguro, la principal ventaja selectiva del comportamiento de incubación de los megápodos, si bien diríase a veces que está compensada con una elevada mortalidad en el primer año de vida. Aunque sabemos poco acerca de la historia natural de los volantones de pavo de matorral, David Priddel, del Servicio de Parques Nacionales y Naturaleza de Nueva Gales del Sur, ha registrado una mortalidad elevada, por inanición, en los pollos de faisán australiano.

Mas, por lo que sabemos, los pavos de matorral prosperan en los bosques tropicales, hasta el punto de haberse convertido en una molestia. Para ahorrarse la tarea de construir los propios, algunos se apropian de los montones de estiércol preparados por el hombre. Quizá para el pavo de matorral esta requisa representa el siguiente paso evolutivo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENERGETICS OF EMBRYONIC DEVELOPMENT IN THE MEGAPODE BIRDS, MALLEE FOWL *LEIPOA OCELLATA* AND BRUSH TURKEY *ALECTURA LATHAMI*. D. Vleck, C. M. Vleck y R. S. Seymour en *Physiological Zoology*, vol. 57, n.º 4, págs. 444-456; julio/agosto de 1984.

GAS EXCHANGE IN THE INCUBATION MOUNDS OF MEGAPODE BIRDS. R. S. Seymour, D. Vleck y C. M. Vleck en *Journal of Comparative Physiology B*, vol. 156, n.º 6, págs. 773-782; noviembre de 1986.

WATER RELATIONS OF BURIED EGGS OF MOUND BUILDING BIRDS. R. S. Seymour, D. Vleck, C. M. Vleck y D. T. Booth en *Journal of Comparative Physiology B*, vol. 157, n.º 4, págs. 413-422; agosto de 1987.

TEMPERATURE REGULATION IN THE INCUBATION MOUNDS OF THE AUSTRALIAN BRUSH-TURKEY (*ALECTURA LATHAMI*). Roger S. Seymour y David F. Bradford en *The Condor* (en prensa).



Sophie Germain

Matemática extraordinaria, luchó contra los prejuicios de la sociedad francesa decimonónica. Produjo en las teorías de números y de elasticidad una obra perdurable

Amy Dahan Dalmédico

Ignoro si podría el lector citar alguna matemática famosa. Casi me atrevo a apostar que no. Pero debería empezar por Hipatías de Alejandría. Sus contemporáneos elogiaron sus trabajos en matemáticas; nada de ella ha sobrevivido. Es posible que fueran destruidos por los fanáticos que en el 415 la apedrearon hasta la muerte a causa de sus creencias paganas. Hubieron de pasar más de 1300 años para llegar a la Marquesa de Châtelet, traductora al francés de los *Principia Mathematica* de Sir Isaac Newton. En 1750, la italiana Maria Gaetana Agnesi, célebre por sus logros en cálculo diferencial, se convirtió en la primera catedrática de universidad.

Al igual que Hipatías, que la Marquesa y que Agnesi, Sophie Germain hubo de luchar enérgicamente contra los prejuicios de su familia, de sus amigos y de sus colegas para poder dedicarse al cultivo de las matemáticas. Mujer de excepcional talento y gran ambición, poseía una pasión por la ciencia que no consentía distracciones. Aprendió por sí sola matemáticas y física y produjo trabajos originales en teoría de números y en teoría de elasticidad. No ha recibido todavía el reconocimiento que merece, sin embargo.

Nació en París, el 1 de abril de 1776, en el decenio anterior al de la Revolución Francesa y un siglo después de la Revolución Científica, un tiempo en que el cosmos hallábase gobernado por las leyes de Newton, y Francia, por los decretos de Luis XVI. Germain apoyó el cambio político, promovió la causa de las matemáticas y la física y estuvo presta a luchar con la máxima energía para derribar las barreras que impedían el acceso de las mujeres a la ciencia.

Su padre, Ambroise-François Germain, centró su atención en la Revolución Francesa. Ambroise pertenecía a la burguesía liberal y culta. Los Germain habían sido una familia de comerciantes durante generaciones y su posición económica era desahogada. Con el fin de proteger sus intereses, Ambroise participó como diputado electo del Tercer Estado en la Asamblea Constituyente de 1789. A los 13 años Sophie era una muchacha tímida y desgarbada. Convencida de que su familia estaba obsesionada por el dinero y la política, se refugió en la biblioteca paterna, lugar donde dio comienzo su desarrollo intelectual. Leyó y estudió todos los libros de matemáticas disponibles. Y lo mismo que le resultaba imposible comprender el interés de sus padres por la política, a ellos no les cabía en la cabeza el amor de la niña por las matemáticas. Consideraron que tal interés era asombroso para su edad e incongruo con su sexo.

Guglielmo Libri-Carucci, matemático italiano que llegaría más tarde a ser amigo de Germain, refiere cómo venció ésta la insistencia de sus padres para que abandonase las matemáticas. De noche, mientras la familia dormía, estudiaba a la luz de la vela; ni siquiera cuando el frío invernal arreciaba hasta solidificar la tinta en los tinteros, ella, envuelta en mantas, abandonaba los libros. Su tenacidad pudo más que la voluntad de su padres. Y a pesar de lo "extraño" de sus intereses, su padre la mantuvo económicamente durante toda la vida. Germain no se casó ni consiguió un puesto profesional con que ganarse el sustento.

Le encantó lo escrito sobre Arquímedes en la *Historia de las Matemáticas* de Jean-Etienne Montucla. Sentíase identificada con la lucha de Arquímedes por continuar sus trabajos en medio del fragor de la invasión romana de Siracusa. Progresó desde el tratado de aritmética de Etienne Bézout hasta las obras de Newton y del matemático suizo Leonhard Euler.

Ni parientes, ni amigos, ni educadores prestaron gran atención a los intereses y talentos de la joven Sophie. Para ellos, carecía de objeto aplicar en algo la mente de una adolescente de buena familia de clase media. Contaba 19 años cuando se fundó la Escuela Politécnica. Consiguió hacerse con las lecciones de muchos de sus cursos, entre ellos, los de análisis, impartidos por Joseph Louis Lagrange, y los de química, de Antoine-François Fourcroy. Durante una de las sesiones, Lagrange pidió a sus alumnos que valorasen el curso. Temerosa de que sus opiniones pudieran ser despreciadas, Germain expuso sus comentarios bajo el nombre de un antiguo alumno, Antoine-August Le Blanc. (Se ignora si Le Blanc dio su consentimiento.)

La educación científica de Germain era cosa insólita en mujeres de su posición social. En el siglo XVIII, sólo algunas damas de la aristocracia recibían alguna enseñanza de ciencia, a través de descripciones divulgativas y específicamente escritas para ellas. Los libros revelaban apenas la ciencia suficiente para que la dama pudiera conversar sobre el tema en sociedad. Francesco Algarotti fue autor de una de las más notables obras de este género: *La filosofía natural de Sir Isaac Newton explicada para uso de las damas.*

Algarotti estaba convencido de que a las mujeres sólo les importaba el amor y la galantería; y así procuró enseñarles física sin descuidar esos otros intereses. Gira su libro en torno a un diálogo entre una marquesa y su interlocutor. En una de las escenas el interlocutor trata de explicar la ley de los cuadrados inversos. Expone que la fuerza de gravitación —o la intensidad de la luz— decrece en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre

1. SOPHIE GERMAIN se distinguió por su notable rendimiento en matemática, pero siendo una mujer de clase media en tiempos de la Revolución Francesa jamás recibió de sus colegas varones el reconocimiento que merecía. Su recuerdo pervive en ese busto que preside el atrio de la École Sophie Germain, un liceo de París.

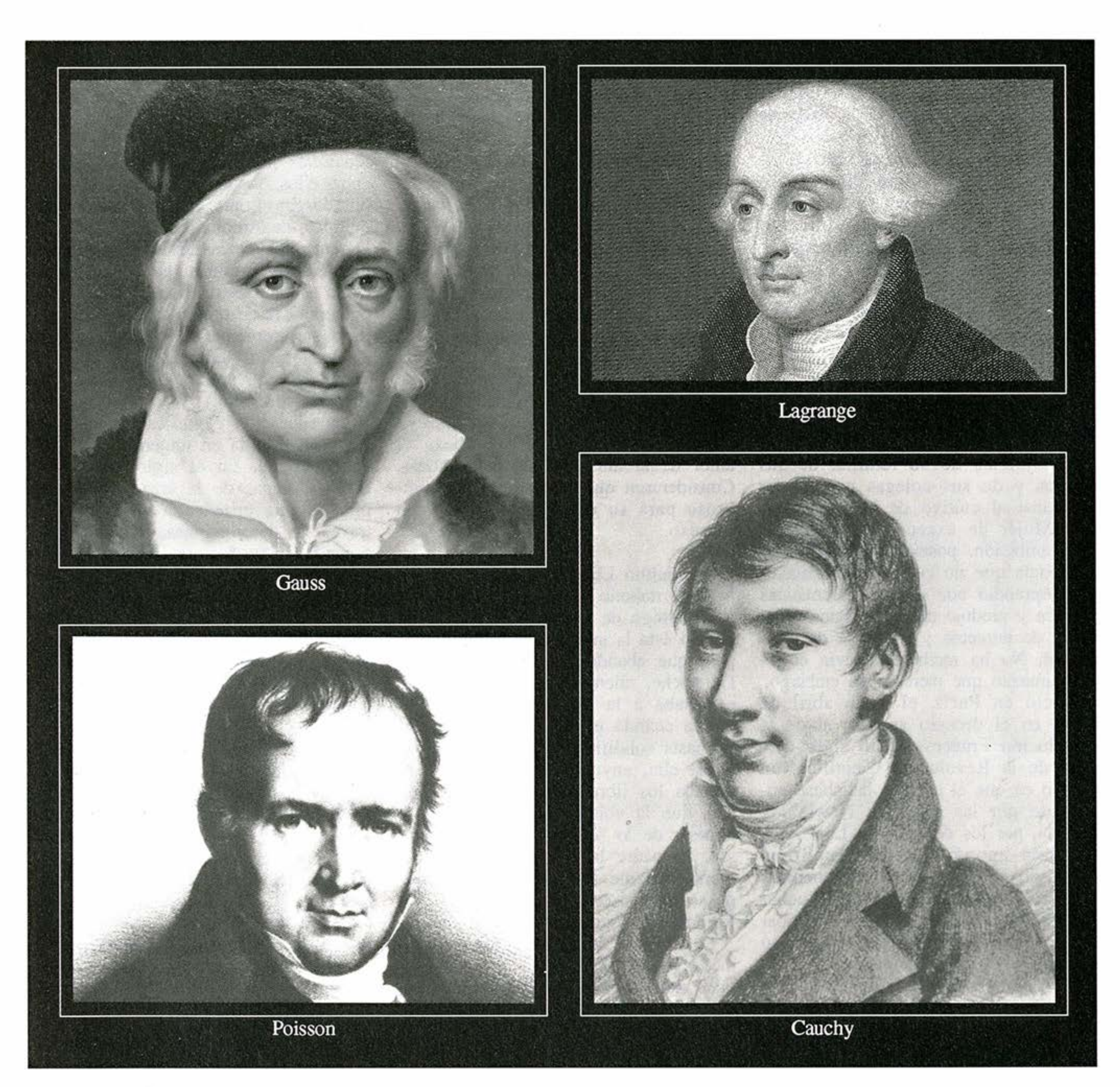
AMY DAHAN DALMEDICO es miembro de plantilla del francés Centro Nacional de Investigaciones Científicas y profesora de la Escuela Politécnica de París.

el objeto y el observador. La marquesa replica que tal noción le es ya conocida. "No puedo dejar de pensar... que esta proporción en los cuadrados de las distancias entre lugares... se verifique incluso en el amor. Así, al cabo de ocho días de ausencia, el amor se torna sesenta y cuatro veces menor que lo era el primero." Digresiones de este jaez llenan las páginas del libro y oscurecen los pocos pasajes donde la física se explica con rigor.

Germain no toleraba tan frívola literatura. Enfurecióse cuando Joseph-Jérôme Lalande dio a entender que a ella le sería imposible comprender la obra de Pierre-Simon Laplace mientras no leyese el libro *La astronomía para las damas*, escrito por el propio Lalande. Germain declaró que jamás volvería a hablar con Lalande.

Su formación fue desorganizada e irregular. Se le concedieron entrevistas con Lagrange y varios otros grandes científicos. Algunos le propusieron problemas de poca monta. Ella suspiraba por una formación académica, pero nunca se le ofreció la oportunidad. No sólo vivió aislada de la comunidad de científicos, sino también de la sociedad de mujeres cultivadas. Su rango no le facultaba para introducirse en la aristocracia. Ni estaba relacionada con ningún científico que pudiera presentar por ella sus ideas, estrategia que funcionó bien en el caso de la duquesa de Gotta y de Madame Lalande.

Quizás ella contribuyese a su propio aislamiento. Rehuía los encuentros sociales por pura modestia y timidez. Estaba convencida, como los enciclopedistas a quienes había leído, de que sus aportaciones a la ciencia resistirían por sí solas las pruebas del paso del tiempo y de los prejuicios sociales. Su alejamiento coincidió con el momento en que la comunidad científica estaba atrayendo a más miembros, organizando más instituciones y promoviendo mayor colaboración que nunca. Ya no



2. FUERON AMIGOS Y RIVALES de Sophie Germain algunos de los más famosos matemáticos y físicos del siglo XIX, pero la comunidad científica, en su mayor parte, la miró con indiferencia. Al principio de su carrera cruzó no pocas cartas sobre teoría de números con Carl Friedrich Gauss. Joseph-Louis Lagrange la animó en sus investigaciones, tanto en matemáticas como en física. Hacia 1814 compitió con Simeon-Denis Poisson en el empeño de idear una teoría de la elasticidad. Al final de su vida colaboró y trabó amistad con Jean-Baptiste-Joseph Fourier, y se carteó con Cauchy.

tenía que estudiar aterida de frío; tendría en cambio que escalar una pared de hielo para lograr el reconocimiento de su trabajo.

Sophie Germain halló algunas de sus mejores oportunidades en la teoría de números en los albores del siglo XIX. Sus primeros contactos profesionales, Lagrange y Adrien-Marie Legendre, estaban ambos muy interesados por la materia y la animaron a estudiarla. Desarrolló, a lo largo de varios años, un conocimiento profundo de los complejos métodos expuestos por el matemático alemán Carl Friedrich Gauss en sus *Disquisitiones Arithmeticae*. Vivamente estimulada por el libro, escribió a Gauss media docena de cartas entre los años 1804 y 1809, que firmaba con el pseudónimo "Le Blanc", temerosa del "ridículo que en una mujer suponía ser erudita".

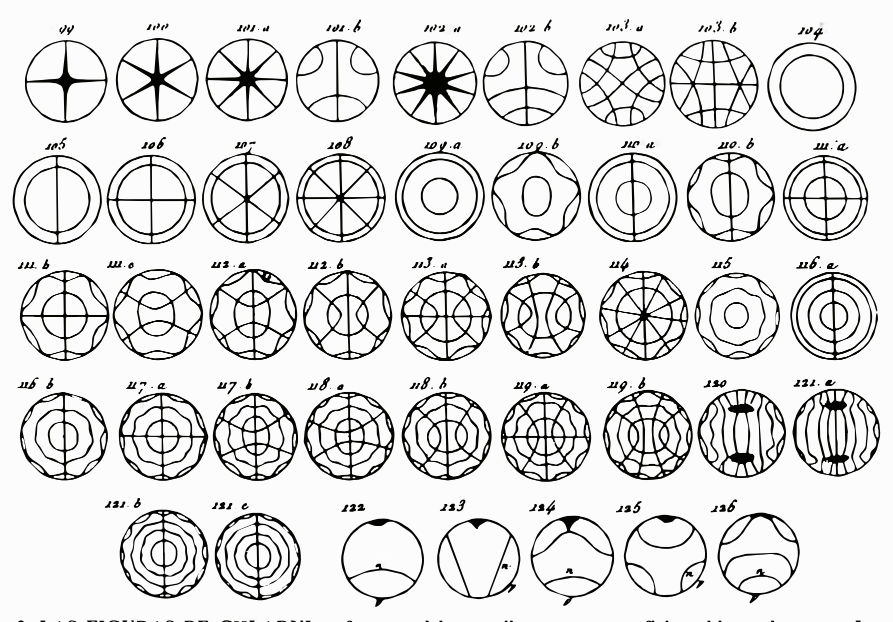
En su primera carta a Gauss, Germain estudia la ecuación de Fermat, a saber,

$$x^n + y^n = z^n$$

en la que x, y, z y n han de ser números enteros. Pierre de Fermat tenía la convicción de poder demostrar que la ecuación no admitía soluciones si n es mayor que 2. Esta conjetura, conocida por "último teorema de Fermat", sigue esperando demostración.

Germain descubrió que la ecuación de Fermat no es resoluble si $n = p - 1$, donde p es un número primo de la forma $8k + 7$. (Por ejemplo, si $k = 2$, p es un número primo, a saber, 23, y n es igual a 22.) Exponía su demostración a Gauss y añadía: "Desdichadamente, la profundidad de mi intelecto no es igual a la voracidad de mi apetito, y tengo por casi temerario molestar a un hombre de genio sin más derecho a reclamar su atención que una admiración necesariamente compartida por todos sus lectores." Gauss respondió: "Me alegra muchísimo que la aritmética haya encontrado en usted un amigo tan capaz. Su nueva demostración... es muy elegante, aunque parece tratarse de un caso aislado y no puede ser aplicada a otros números."

En 1806 Germain remitió un mensaje a Gauss por intermedio de Joseph-Marie Pernety, militar amigo suyo. Germain temía por la seguridad de Gauss, pues Napoleón I había conquistado casi toda Prusia hacía poco. Le contó a Pernety que temía que Gauss hubiera seguido la misma suerte que Arquímedes, muerto a manos de los romanos. Pernety envió un mensaje haciendo saber que Gauss se encontraba bien, pero que el matemático no conocía a Sophie Germain. En su siguiente carta a Gauss, Germain —alias Le Blanc— revelaba su auténtica identidad.



3. LAS FIGURAS DE CHLADNI se forman al hacer vibrar una superficie cubierta de arena. La arena se concentra allí donde las vibraciones son más débiles. Las aportaciones de Sophie Germain a la teoría matemática que explica las figuras revisten el mayor interés. La ilustración procede de la edición de 1809 del *Traité d'Acoustique* de Ernst F. F. Chladni.

Gauss quedó tan sorprendido como encantado. "Una mujer, a causa de su sexo y de nuestros prejuicios, encuentra infinitamente más obstáculos que un hombre para familiarizarse con problemas complicados. Por lo tanto, si alcanza a superar tales barreras y a penetrar en lo que más recóndito se encuentra, es indudable que posee la más notable valentía, talento extraordinario y un genio superior." Gauss era sincero en sus elogios a Germain, como han revelado sus cartas al astrónomo alemán Heinrich W. M. Olbers.

Germain volvió a escribirle a Gauss en 1808, exponiendo esta vez el que sería su trabajo más brillante en teoría de números. Demostraba en él que si x, y, z son enteros tales que

$$x^5 + y^5 = z^5$$

entonces, al menos uno de los números x, y o z ha de ser divisible por 5. El teorema de Germain constituyó un paso muy importante para la demostración del teorema de Fermat en caso de $n = 5$.

Gauss nunca comentó el teorema de Germain. Hacía poco que había sido nombrado para la cátedra de astronomía en Göttingen y tuvo que dejar de lado su trabajo en teoría de números. El teorema de Germain cayó en un olvido casi absoluto. Legendre lo menciona en un artículo de 1823, donde expone su demostración del último teorema de Fermat en el caso de que n sea 5. (Bernard Frénicle de Bessy había demostrado en 1676 el caso correspondiente a $n = 4$; Euler, en 1738, había hallado la demostración del caso $n = 3$.) El teorema de Germain constituía el resultado más importante relacionado con el teorema de Fermat desde 1738 hasta las aportaciones de Ernst E. Kummer, en 1840.

Sophie Germain consideró a Gauss su mentor en teoría de números. Al cesar su correspondencia con él, hubo de procurarse nuevos problemas y nuevos guías. En 1809 halló un reto que habría de inspirar algunos de sus trabajos más excelentes. Se propuso explicar los clásicos experimentos de Ernst F. F. Chladni, físico alemán y estudioso de las vibraciones de las láminas elásticas. Chladni extendía arena fina sobre una lámina de vidrio; frotaba después la lámina con un arco de violín, haciéndola vibrar. La arena, rebotando, se alejaba de las regiones en vibración, acumulándose en los "nodos": lugares que permanecían estáticos. La placa quedaba cubierta en pocos segundos por una serie de líneas arenosas. Las formas y figuras resultantes eran espectaculares: círculos, estrellas y otras formas geométricas. La naturaleza de la configuración dependía de la forma de la lámina, de la ubicación de los soportes y de la frecuencia de la vibración.

En una visita a París, en 1808, Chladni presentó sus experimentos ante 60 matemáticos y físicos de la Primera Clase del Instituto de Francia, una sección de la Academia Francesa de Ciencias. Sus demostraciones dejaron tan atónitos a los científicos que le pidieron una repetición de sus experimentos ante Napoleón. El emperador quedó igual de impresionado y convi-

no en que la Primera Clase debería conceder una medalla de un kilogramo de oro a quien lograse concebir una teoría capaz de explicar los experimentos de Chladni. La Primera Clase anunció el concurso en 1809 y estableció un plazo de dos años para presentación de trabajos.

Germain asió con fuerza esta oportunidad. Durante más de diez años se había venido esforzando por dejar a punto una teoría de la elasticidad. Iba a competir o colaborar con los físicos y matemáticos más eminentes. Se sentiría ufana de contribuir a una cuestión que exploraba los confines de la ciencia decimonónica. A pesar de ello, seguiría extramuros del mundo de la ciencia. La etiqueta exigía que obtuviera una carta de invitación cada vez que deseaba visitar una institución. Quien la cursaba tenía entonces el deber de proporcionarle transporte y acompañamiento. Estas formalidades limitaban la libertad de Germain para tratar con los científicos. Tuvo así muchas dificultades para dar el salto desde el campo de la teoría de números a la teoría de elasticidad.

Buscando doctrina sobre la teoría de las vibraciones se enfrascó en la *Mecánica analítica* de Lagrange y en los ensayos de Euler sobre la teoría de las vibraciones de varillas elásticas. Trató de explicar el comportamiento de las láminas elásticas con los métodos empleados por Euler, quien había sugerido que las fuerzas aplicadas a una varilla son contrarrestadas por una fuerza de elasticidad interna y afirmaba que la fuerza de elasticidad en cualquier punto de la varilla era proporcional a la curvatura de la varilla. Los ensayos de Euler animaron a Germain a inventar una hipótesis similar: propuso que, en cualquier punto de la superficie, la fuerza de elasticidad es proporcional a la suma de las curvaturas principales de la superficie en el punto considerado. Las curvaturas principales de una superficie en un punto son los valores máximo y mínimo de las curvaturas de todas las curvas resultantes de seccionar la superficie mediante planos perpendiculares a ella en dicho punto.

Germain fue la única que presentó una ponencia al concurso en 1811, pero su trabajo no ganó el premio. No apoyaba sus hipótesis en principios físicos, y no lo hizo porque entonces carecía de los necesarios conocimientos de análisis y de cálculo de variaciones. Su trabajo sirvió, no obstante, para encender nuevas luces. Lagrange, uno de los jueces del concurso, corrigió los errores de los cálculos de Germain y obtuvo una ecuación diferencial que —estaba convencido— podría describir las configuraciones de Chladni. Lagrange dedujo que, si la amplitud de la variación es z y ésta es pequeña, entonces

$$\frac{d^2z}{dt^2} + k^2\left[\frac{d^4z}{dx^2} + \frac{d^4z}{dy^2} + \frac{d^4z}{dx^2dy^2}\right] = 0$$

donde t es el tiempo, k es una constante y (x, y) representa un punto de la lámina.

En 1811, la Primera Clase amplió en otros dos años el plazo de presentación de trabajos al concurso; de nuevo sólo se presentó un trabajo de Germain. Demostraba en él que la ecuación de Lagrange sí generaba las configuraciones de Chladni en varios casos sencillos. No pudo, en cambio, conseguir una deducción satisfactoria de la ecuación de Lagrange a partir de principios físicos. Por este trabajo recibió la mención honorífica de la Primera Clase.

Más o menos por entonces, Simeon-Denis Poisson comenzaba a invadir el predio intelectual de Germain. Acabaría convirtiéndose en el principal de sus rivales. En acusado contraste con la experiencia de Germain, Poisson abordaba el problema de la elasticidad provisto de todos los recursos de que pudiera disponer un científico del siglo XIX.

Poisson ingresó en la Escuela Politécnica en 1798, cuando contaba 17 años. Lagrange y Laplace se percataron de su talento para la resolución de problemas y de su capacidad de abstracción. Con el apoyo de Laplace, Poisson medró con rapidez en los círculos académicos. Llegó a profesor de la Politécnica y de la Facultad de Ciencias de París. Frecuentaba la famosa Société d'Arcueil, donde acudían algunas de las mentes más preclaras a exponer y realizar nuevos experimentos. Laplace y Claude-Louis Berthollet dirigían la sociedad; Poisson era el asesor matemático. En 1812, Poisson, que había penetrado hasta el corazón de la comunidad científica, fue elegido miembro de Primera Clase.

Poisson buscaba explicar las vibraciones de las láminas elásticas mediante una aplicación del modelo newtoniano de la física. Partió de la idea de que una lámina está compuesta por moléculas que se repelen y atraen mu-

4. LA NOCION DE CURVATURA desempeñaba un papel fundamental en el trabajo de Sophie Germain sobre elasticidad. Dada una curva lisa, a cada uno de sus puntos le podemos asignar un círculo que se ciña lo más estrechamente posible a la curva, con la que compartirá una recta tangente. La curvatura de la curva en ese punto es la inversa del radio del círculo. En el caso de superficies, la curvatura en un punto se define a partir de las curvaturas de las curvas producidas al cortar la superficie con planos perpendiculares a ella en ese punto. De todas esas curvas, la de curvatura máxima y la de curvatura mínima se denominan curvas principales.

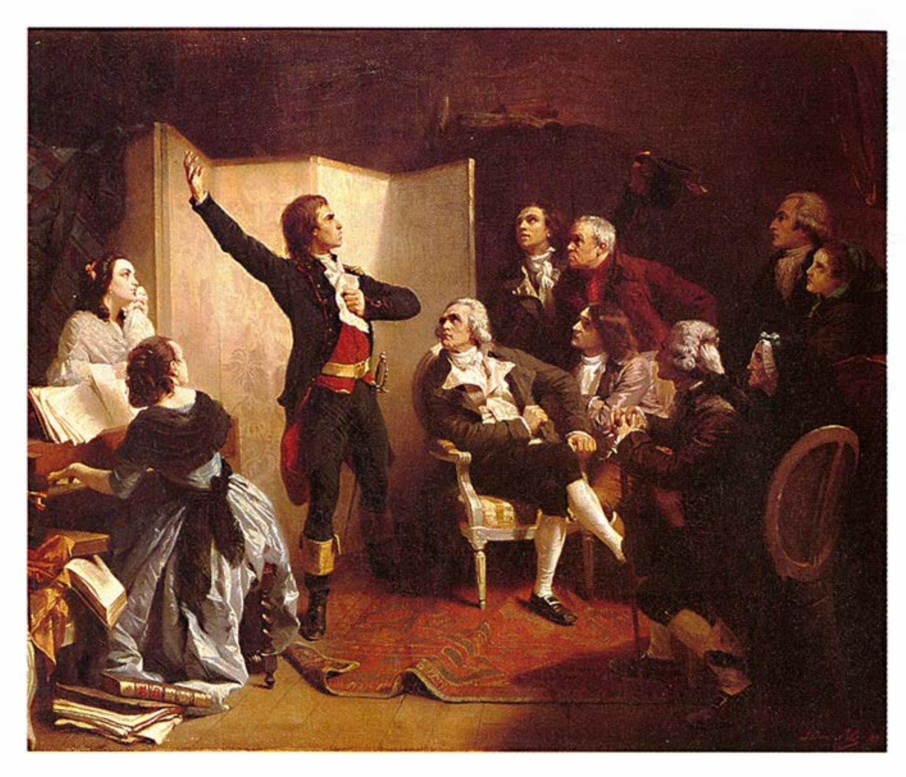
tuamente. Formuló lo que entonces se pudo considerar un sistema de hipótesis plausibles. Dedujo una fórmula muy complicada y, simplificándola, llegó a la ecuación de Lagrange. Con la perspectiva de hoy, las hipótesis de Poisson nos parecerían absurdas y si tuvo éxito en deducir la ecuación de Laplace se debió solamente a que tenía conocimiento de los trabajos de Germain y Lagrange.

Poisson publicó su artículo sobre láminas elásticas en 1814. Su puesto de miembro de la Primera Clase le impedía pugnar por el premio. Muchos de sus iguales creían que Poisson había descubierto una teoría que explicaba los mecanismos físicos de las figuras de Chladni; a pesar de ello, la oferta del premio se mantuvo.

"He sentido muchísimo no conocer el trabajo de Poisson", escribía Germain en 1815 en un ensayo sobre elasticidad. "He pasado esperando por su publicación un tiempo que me era precioso." Ella, en este artículo, atacaba el enfoque de Poisson, al tiempo que trataba de presentar su propia explicación. Germain postulaba que la fuerza de elasticidad es proporcional a la fuerza aplicada, la cual, a su vez, está relacionada con la deformación de la superficie. La fuerza en un punto concreto es proporcional a la suma de todas las curvaturas de las curvas que pasan por el punto. Demostraba a continuación que la suma de todas las curvaturas está relacionada con la suma de las curvaturas máxima y mínima. Finalmente, deducía la ecuación de Lagrange a partir de la suma de las curvaturas principales.

Este ensayo se convirtió en la tercera presentación de Germain al concurso, cuyo jurado estaba compuesto en esta ocasión por Legendre, Laplace y Poisson. Estos no podían aceptar su postulado de que el efecto —la deformación— es necesariamente proporcional a la causa, esto es, a la fuerza aplicada. A decir verdad, se tardaría decenios en hallarse una explicación. Con esta reserva los jueces concedieron a Germain el premio de la Primera Clase. No asistió a la ceremonia de entrega; quizá considerase que los jueces no apreciaron plenamente su trabajo, o, sencillamente, no le gustara aparecer en público.

Para Germain, el premio representaba el reconocimiento formal de su competencia. Le confería autoridad y confianza. Pero la comunidad científica no le mostró el respeto obligado. Poisson envió un reconocimiento lacónico y formal de su trabajo. Evitó cualquier clase de discusión seria con ella y le hizo el vacío en público. Años atrás, se consideraba a sí misma novicia entre gigantes. Ahora no sentía ninguna admiración por sus colegas.



5. LOS SALONES decimonónicos fueron quizá las únicas instituciones donde resultaba socialmente aceptable que las mujeres participasen en conversaciones sobre los grandes descubrimientos y debates científicos de la época. Sophie Germain luchó por ser admitida en las instituciones y sociedades científicas, donde podría exponer seriamente sus teorías. La escena que vemos, pintada por Isidore Pils en 1849, muestra un salón de la época en Estrasburgo.

Pero pronto se le levantarían los ánimos, gracias a su nueva amistad con Jean Baptiste-Joseph Fourier. Ambos habían sufrido en su carrera la rivalidad con Poisson. Merced a los esfuerzos de Fourier, Germain comenzó a participar en las actividades de la comunidad científica parisiense. Asistió a las sesiones de la Academia de Ciencias, siendo la primera mujer no esposa de académico en hacerlo. En el decenio de 1820 emprendió un ambicioso proyecto de investigación para refinar sus demostraciones y sus aportaciones a la teoría de números. Legendre y ella trabajaron en el proyecto como colaboradores del mismo rango. Asímismo, publicó una revisión de su teoría de elasticidad. Se interesó por diversos campos científicos y se codeó en actos sociales con la elite intelectual. Su curiosidad y encanto fueron apreciados por todos.

Aunque la obra que Germain produjo merecía el reconocimiento académico, nunca recibió título alguno. En 1830 Gauss no consiguió persuadir a la Universidad de Göttingen para que le concediera el doctorado *honoris causa*.

Murió el 27 de junio de 1831, a los 55 años, tras luchar durante dos con un cáncer de mama. En su certificado de defunción se la describe como "rentière", cuya traducción nos remite a la "persona que posee recursos propios" y, también, "mujer independiente".

Antes de su muerte esbozó un ensayo filosófico, que nunca llegaría a concluir. Se publicó póstumamente con el título de *Consideraciones generales sobre las ciencias y las letras*. Trataba en el ensayo de identificar el proceso intelectual de todas las actividades humanas. Estaba convencida de que el universo intelectual está repleto de analogías. El espíritu humano, tras reconocerlas, llega al descubrimiento de los fenómenos naturales y de las leyes del universo. Nosotros deberíamos reconocer las analogías entre la vida de Sophie Germain y la nuestra propia, analogías que deberían llevarnos a ansiar la excelencia y rechazar el prejuicio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

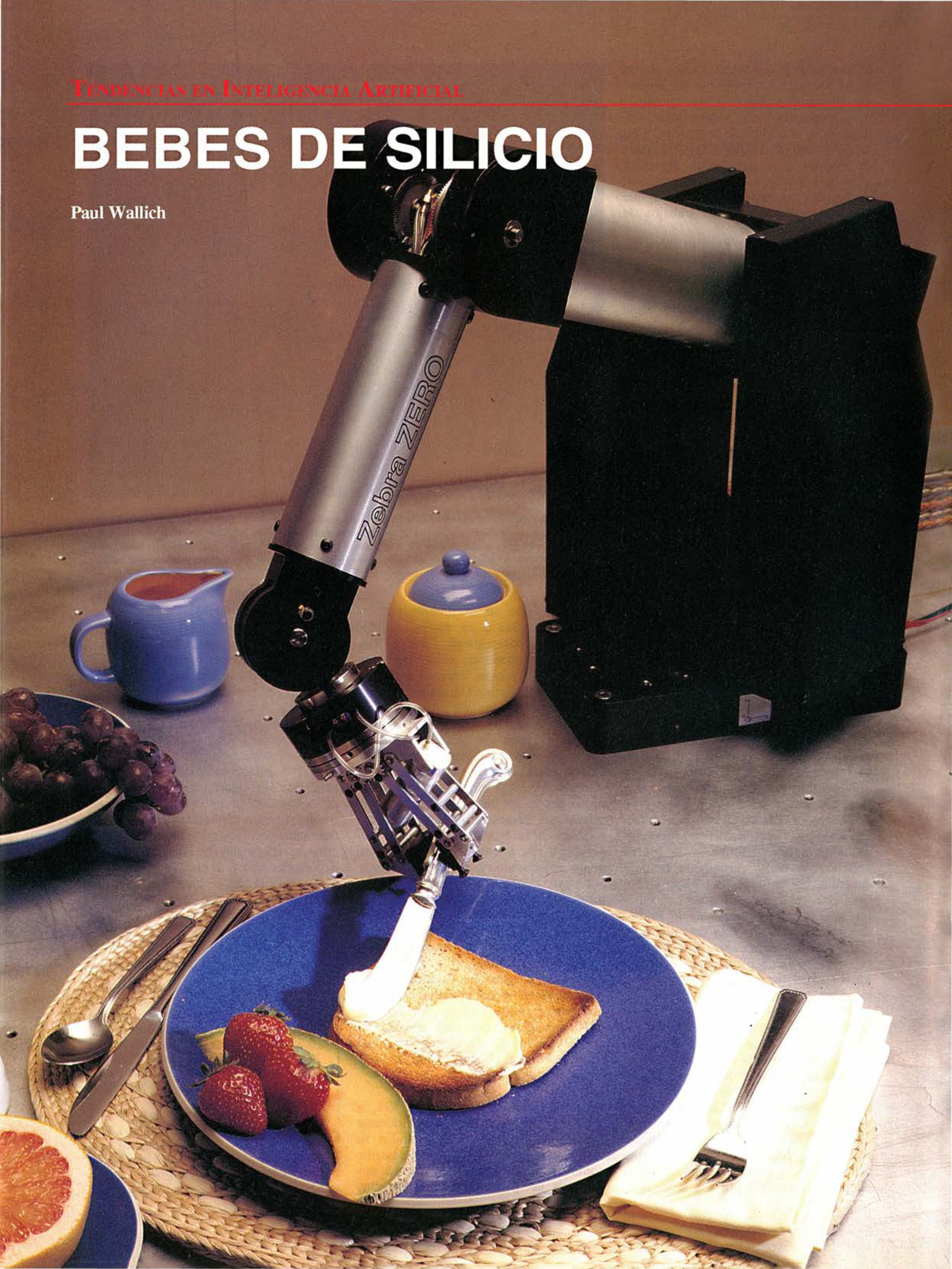
SOPHIE GERMAIN: AN ESSAY IN THE HISTORY OF THE THEORY OF ELASTICITY. Louis L. Bucciarelli y Nancy Dworsky. D. Reidel Publishing Company, 1980.

MÉCANIQUE ET THÉORIE DES SURFACES: LES TRAVAUX DE SOPHIE GERMAIN. Amy Dahan Dalmédico en *Historia Mathematica*, vol. 14, n.º 4, págs. 347-365; noviembre de 1987.

ÉTUDE DES MÉTHODES ET DES "STYLES" DE MATHÉMATISATION: LA SCIENCE ET L'ELASTICITÉ. Amy Dahan Dalmédico en *Sciences à l'Époque de la Révolution*. París, Librairie Blanchard, 1988.

BEBES DE SILICIO

Paul Wallich





Los investigadores están tratando de construir máquinas que emulen el razonamiento y la conciencia de la realidad propia de los humanos. Pero en el mundo real, hasta la ínfima competencia de una hormiga voladora se les resiste... por ahora.

Chirr... Chirr... Rass... Rass... Ras... Un robot unta mantequilla en una tostada. Y lo está haciendo bastante bien, habida cuenta de que apenas comienza a aprender.

Aunque para los humanos no presenta dificultad, la sencilla tarea de extender mantequilla sobre las tostadas resulta, para las máquinas, de una complejidad superlativa. Constituye asimismo una tarea afín a multitud de otros problemas que habrán de afrontar las máquinas si aspiran a desenvolverse en el mundo real. Un robot convencional, que sólo sabe mover su pinza según una trayectoria concreta, haría con la tostada y la mantequilla un auténtico estropicio.

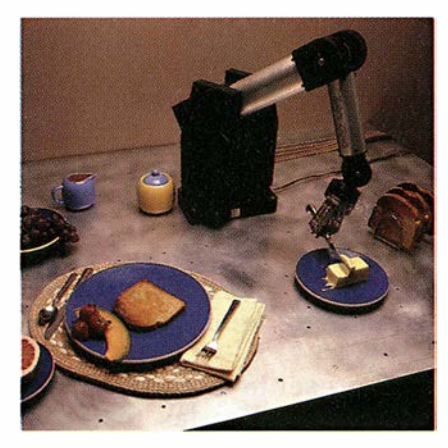
La acción de untar exige un incesante reajuste de acciones basado en la realimentación sensorial: si la resistencia es excesiva, hay que relajar la presión; si demasiado leve, modificar el ángulo de ataque del cuchillo, y así sucesivamente. El cálculo previo de la trayectoria exigiría cuidadosas mediciones de la viscosidad de la mantequilla y de la superficie de la tostada y la confección de un modelo no lineal de tipo elemento-finito, seguido de varias horas de computación en un superordenador Cray.

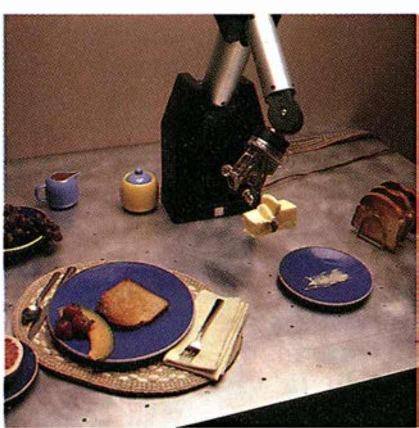
El robot experimental de la fotografía (laboratorio de Stanley J. Rosenschein, en Teleos Research, Palo Alto) pertenece a un nuevo linaje de máquinas, que constituye la vanguardia de la investigación en inteligencia artificial (IA). Se espera de esta emergente generación que, a diferencia de los sistemas de IA basados en el vasto acopio de conocimientos arcanos (caso de los sistemas expertos), actúen con percepción y estén imbuidos de sentido común. Esta labor no sólo hace avanzar las técnicas de visión y detección por máquina, sino también la automatización del razonamiento, la planificación, la representación de conocimientos y la comprensión del lenguaje natural.

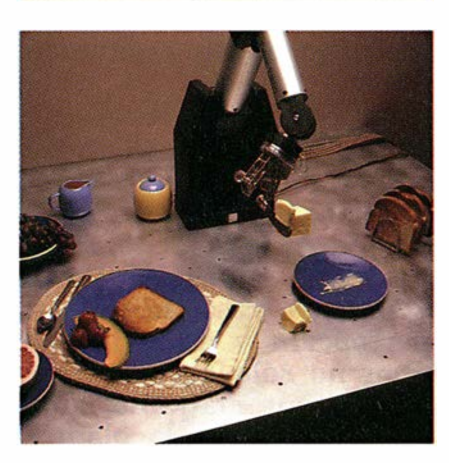
Las anteriores son otras tantas ramas en que se subdividió la inteligencia artificial hace una generación al ser evidente que no bastaría la mera programación para conseguir un ordenador que mereciera la consideración de inteligente. Así las cosas, Allen Newell, de la Universidad Carnegie-Mellon, que fue uno de los pioneros de la inteligencia artificial, lanzó hace dos años un lla-

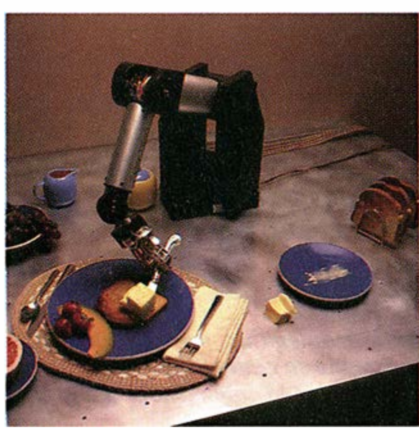
1. UN ROBOT sensible a la fuerza puede untar mantequilla, pero no saborear el desayuno. La interacción con el mundo sigue siendo en gran medida un problema no resuelto en las máquinas que aspiran a emular la inteligencia humana e incluso a adquirir cierto sentido de su propia existencia.

Así no se unta la mantequilla









mamiento a los investigadores para devolver a esta disciplina la unidad que tuvo, animándose a construir lo que denominó "sistemas inteligentes integrados". Según él, la gran eficacia demostrada por las distintas especialidades de la IA era ahora suficiente para edificar un todo.

En respuesta —dice Newell— "salió a la luz toda una serie de personajes interesantes", que en su mayor parte estaban ya trabajando en "vehículos autónomos" , "agentes inteligentes" o, sencillamente, en cosas raras. Todos ellos compartían el propósito de no tratar de construir meros ordenadores "listos", sino criaturas mecánicas capaces de funcionamiento autónomo en el mundo.

Dos grandes cuestiones pesan sobre quienes han respondido al llamamiento de Newell. Para empezar, los investigadores no coinciden en la esencial definición de lo que caracteriza a una conducta inteligente. En segundo lugar, están escindidos en dos campos, por lo menos, en cuanto a la manera de alcanzar lo que entienden por inteligencia —sea lo que fuere— a partir del actual estado de la técnica. Los investigadores en IA tradicional, como Newell, confían en el razonamiento, el aprendizaje y el procesamiento simbólico, al tiempo que Rodney A. Brooks, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otros jóvenes turcos evitan a toda costa lo que pueda parecer racionalidad, y se dedican a proyectar criaturas mecánicas que actúan enteramente por reflejo.

Y aun cuando hubiera consenso entre los investigadores en IA (idea que provoca la risa de los especialistas), la reunificación de la inteligencia artificial no sería nada fácil. Los sistemas expertos están resolviendo miríadas de problemas, desde el diagnóstico de fallos en motores diesel hasta la tasación de bancos de tamaño medio. El mantenimiento de aviones se planifica mediante programadores automáticos, que facilitan también el diseño de las cadenas de montaje. Los sistemas expertos en lenguajes naturales son capaces de analizar la mayoría de las frases casi tan bien como pueda hacerlo una persona. No obstante, la experiencia demuestra que no es posible combinar sin más módulos tomados de estas diversas disciplinas y lograr que el conjunto funcione sin tropiezos.

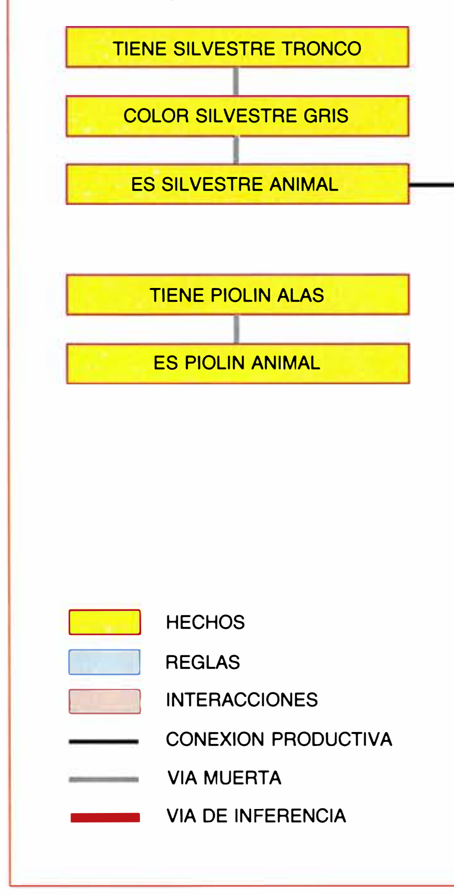
Según relata Kenneth D. Forbus, de la Universidad Northwestern, en un "taller" celebrado recientemente los constructores de "cacharros" hablaron con optimismo de una máquina autónoma capaz de efectuar una variedad de tareas y de sobrevivir durante un año en el mundo, sin auxilio. "Así que me dediqué a preguntar a muchos

Representación del conocimiento

De ordinario, los programas de inteligencia artificial representan su conocimiento en forma de asertos lógicos enunciados en un lenguaje de programación especializado. Ciertos asertos corresponden a hechos sencillos —(TIENE PIOLIN ALAS) (ES PIOLIN PAJARO)— mientras otros, las reglas, codifican información sobre conexiones: (IMPLICA (HAMBRIENTO SILVESTRE) (META SILVESTRE (Y (POSEE SILVESTRE ?X) (COMESTIBLE ?X))(CONSUME SILVESTRE ?X))) [Traducción: "Si Silvestre está hambriento, querrá poseer algo comestible y consumirlo."]

Un "ingenio inferencial" responde a nuevos asertos inspeccionando su base de conocimientos en busca de hechos adicionales basados en reglas y hechos. Si a un sistema se le dijera que Silvestre está hambriento, el sistema afirmaría que tiene las metas adecuadas. Luego podría examinar su base de conocimientos en busca de objetos comestibles y afirmar que Silvestre quería poseer y comer uno de ellos.

El razonamiento que procede desde las reglas hasta el nuevo co-

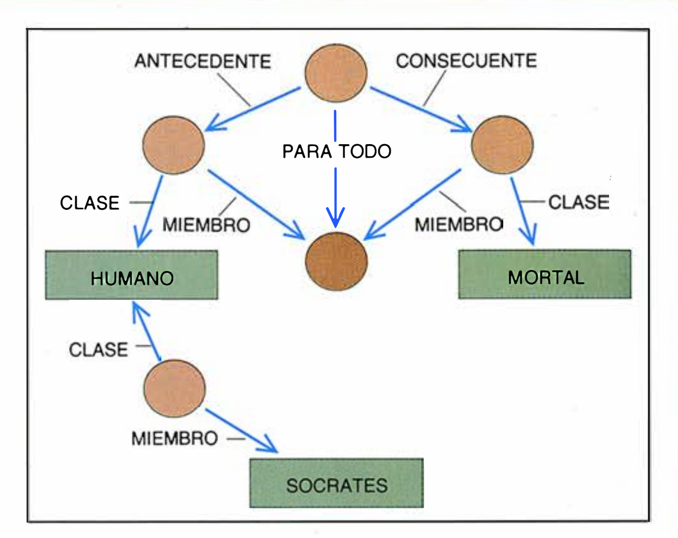


nocimiento suele denominarse "concatenación progresiva". Los sistemas de inferencia pueden también efectuar concatenación regresiva desde conocimientos existentes con el fin de responder a preguntas. Por ejemplo, al preguntársele si Silvestre quería poseer una llave de tuercas, el sistema vería que tener hambre puede ser una razón para desear poseer un objeto y en consecuencia verificaría si Silvestre está hambriento y si las llaves de tuercas son comestibles. De ser falsa alguna de esas posibilidades, continuaría buscando otras reglas que pudieran acabar por implicar (META SILVESTRE (POSEER SILVESTRE LLAVE-DE-TUERCAS)).

La codificación de hechos y acciones puede incurrir en errores. Sea el problema "la gravedad se ha ahogado". La primera vez que un investigador en comprensión del lenguaje natural intentó representar la noción de caída, tradujo "X ha caído" por "la gravedad ha llevado a X hacia abajo". En otro lugar de su sistema había una regla indicando que si uno se cae en un río y no sabe nadar, se ahoga. Dado que la gravedad, en cuanto fuerza de la naturaleza, carece de brazos y piernas, encuentra un fin desdichado, aunque inverosímil.

Otros hechos, como "los peces nadan", en realidad no son en absoluto hechos, y las tentativas de codificarlos generan un sinfín de dificultades. Hay peces que caminan sobre sus aletas; otros están cocinados. Los investigadores han recurrido al "razonamiento tácito" ("normalmente, los peces nadan") y a la "inferencia no monotónica" —revocación de cualesquiera conclusiones que puedan haber dependido de la creencia de que un pez concreto nada— con el fin de generar conclusiones automáticas en presencia de incertidumbre y error.

Cuando los objetos de una base de conocimiento tienen relaciones mutuas complejas los investigadores recurren a representaciones semánticas reticulares. Las redes constan de nodos representativos del objeto y de enlaces que muestran conexiones nodales. Los enlaces pueden denotar relaciones sencillas, como "ES-UN" o "PARTE-DE", u otras más complejas, como "TIENE-DERECHO-LEGAL-A", "CREE" u "OPERA-SOBRE". Un programa que busque deducir información relativa a un objeto determinado que pertenezca a la red semántica no tiene más que ir siguiendo los enlaces adecuados.



Las redes semánticas pueden recurrir a la "activación dispersa" para modelar conductas cognoscitivas como la libre asociación. El método consiste en enviar señalizadores hacia el exterior de nodos que representan objetos o conceptos. Al cruzarse los señalizadores de distintos nodos, los trayectos de retorno a los nodos paternos representan una cadena de asociaciones.

PETICION
(META SILVESTRE
(POSEER SILVESTRE LLAVE-DE-TUERCAS))

IMPLICA (Y (ES ?X ANIMAL)
(NO-COMIDO-HACE-POCO ?X))
(HAMBRIENTO ?X)

IMPLICA (HAMBRIENTO ?X)
(META ?X (Y (POSEER ?X ?Y)
(COMESTIBLE ?Y)))

IMPLICA (ES HERRAMIENTA ?X)
(NO (COMESTIBLE ?X))

COMESTIBLE CACAHUETES

COMESTIBLE BRECOL

COMESTIBLE NUECES

COMESTIBLE ALMENDRAS

ES LLAVE-DE-TUERCAS

IMPLICA (Y (META ?X (POSEER ?X ?Y)))
(NO (CONOCIDO ?X (UBICACION ?Y)))
(META ?X (HALLAR-UBICACION ?Y))

Y (CONTIENE CESTILLO-34 CACAHUETES)
(CERRADO CESTA-34)

IMPLICA (META ?X USAR-HERRAMIENTA-PARA-ABRIR)
(META ?X (Y (POSEER ?X ?Y)
(ES HERRAMIENTA ?X)))

IMPLICA (Y (META ?X POSEER ?Y)
(EN-CERRADO-RECIPIENTE ?Y))
(META ?X USAR-HERRAMIENTA-PARA-ABRIR)

RESPUESTA
(PETICION (NO-COMIDO-HACE-POCO SILVESTRE))



2. RODNEY A. BROOKS, del MIT, y su despreocupado amigo Genghis son los principales exponentes de la tesis de que la conducta inteligente no precisa de razón.

cuánto tiempo duraban sus respectivos sistemas." La respuesta fue que nadie había construido hasta entonces nada que sobreviviera más de unas pocas horas. Las causas de los fallecimientos eran tan diversas y variadas como las propias máquinas: unas veces, los programas que se quedan "colgados", refiere Forbus; otras, el agotamiento de las baterías. Lo más frecuente es, empero, que el sistema autónomo entra en una situación de la que ni el razonamiento ni los servomotores son capaces de sacarlo; por ejemplo, atascado bajo una silla.

Dicho crudamente, los investigadores en sistemas inteligentes integrados no han logrado aún construir una máquina con la capacidad de supervivencia de una hormiga voladora, y, no digamos, con las destrezas sensoriales y de comportamiento suficientes para hallar otra hormiga y aparearse con ella.

Los módulos tomados de distintas partes de la IA no funcionan coordinadamente, porque los investigadores que los construyeron atendieron a cuestiones que los demás no se planteaban y porque, en su mayoría, dejaron de lado otros aspectos que sí están resultando cruciales para la inteligencia integrada. Por citar un caso, el paradigma de visión implícito en casi todos los algoritmos de visión artificial está mal orientado, opina Thomas M. Mitchell, de la Universidad Carnegie Mellon. "Gran parte del trabajo consistía en conseguir que el programa interpretase una [sola] imagen" e identificase los objetos contenidos en ella. Pero las criaturas artificiales que existen en el mundo han de interpretar un flujo continuo de imágenes, cada una de las cuales se diferencia muy poco de la anterior. Además, es posible que importe menos la identidad de los objetos que el evitar tropezar con ellos.

Aunque ya se están utilizando sistemas de visión artificial en robots comerciales, hasta hace poco los especialistas no habían considerado casi en absoluto la visión en máquinas móviles. Mitchell, por dar un nombre, opina que la gama de problemas que va desde la visión binocular hasta la identificación de objetos de contornos ambiguos pueden resolverse simplemente moviendo los ojos del robot, en lugar de aumentar la potencia de cómputo. Cita al respecto los trabajos sobre "visión animada" realizados por Dana H. Ballard, de la Universidad de Rochester, demostrando que muchos algoritmos de procesamiento de imágenes se simplifican enormemente si se considera que los seres vivientes pueden mover la cabeza y fijar ambos ojos en el objeto de su atención.

Existe luego el problema planteado por los llamados sistemas de mantenimiento de la verdad y de razonamiento tácito, que tratan de salir airosos frente a información incierta o contradictoria. Tomemos, por ejemplo, el enunciado "las aves vuelan". Como Marvin L. Minsky, del MIT, y otros muchos han señalado, ello es cierto, salvo que se trate de pingüinos, avestruces, dodós u otras aves extintas o que se les hayan recortado las alas, o que estén encerradas en una jaula pequeña, o que estén disecadas y fijadas a una percha, o que hayan sido psicológicamente condicionadas desde polluelos a permanecer en el suelo... y así sucesivamente. Según Mitchell, en lugar de reflexionar furiosamente tratando de esclarecer a priori si un ave concreta vuela, "un robot podría perfectamente dedicarse a mirar a Piolín (el popular canario de los dibujos animados) y tratar de averiguar si puede volar".

Atila el insecto

Brooks es el miembro más significado de la facción de IA partidaria de consignar al baúl de los recuerdos la visión por máquina, el mantenimiento de la verdad y casi todo el resto de la inteligencia artificial. Sostiene que las distintas subdisciplinas en que se escindió la IA se han dedicado básicamente a "buscar bajo la farola", seleccionando las áreas de estudio más por su elegancia conceptual o susceptibilidad de análisis que por su utilidad. En artículos titulados "Inteligencia sin razón" o "Los elefantes no juegan al ajedrez", Brooks aduce que en las máquinas proyectadas para vivir en el mundo no hay lugar para refinadas construcciones lógicas ni elegantes técnicas de representación del conocimiento.

Brooks, en cambio, cifra sus esperanzas en la que denomina "arquitectura de subsunción", en la cual se edifican conductas complejas como la exploración del entorno a partir de acciones elementales, verbigracia, el movimiento de una sola pata. Para estructurar las acciones del robot, la arquitectura de subsunción se apoya muchísimo más en la naturaleza del mundo exterior que en refinados razonamientos. Por ejemplo, si el robot encuentra un obstáculo, lo que importa es rodearlo, no determinar cómo llegó allí. Quizás el robot ni siquiera necesite recordar que allí hay un obstáculo; después de todo, lo va a detectar perfectamente la próxima vez que se tope con él.

Esta representación procedimental del conocimiento, sostiene la investigadora Pattie Maes, del MIT, no cae en el círculo vicioso de la IA tradicional, que trataba de construir un modelo del mundo exterior con coherencia lógica. "La correspondencia entre percepción y representaciones internas resulta demasiado difícil de establecer", dice Maes.

Los robots de Brooks, unos insectoides a los que ha bautizado Atila y Aníbal, contienen multitud de microprocesadores y funcionan acoplando sensores, procesadores y actuadores en un estrecho bucle. Las patas, por ejemplo, se pasan casi todo el tiempo ejecutando un programa que comprueba su posición y las mantiene bien plantadas. Si las condiciones provocan la conducta ambulatoria, un procesador central envía a las patas señales de "marcha", pero no se ocupa realmente de coordinar su conducta. Los programas individuales integrados en cada pata operan independientemente unos de otros. Maes sostiene que la "conducta emergente" de estos procesos paralelos puede imitar mejor lo que en realidad acontece en el cerebro que la concepción de una mente consciente, centralizada y omnímoda, propia de la "psicología de masas".

Pese a su aparente sencillez, la subsunción puede originar actividades francamente complejas. Uno de los robots diseñados por el grupo recorrió las salas del Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT, "recogiendo" latas de refresco (al menos en una ocasión, proclama el texto publicado) aun sin poseer ninguna noción específica de lo que hacía. El módulo de "aproximación" acercaba la pinza del robot a todo lo que tuviera forma de lata, cerrándose aquélla siempre que algo aparecía entre sus garras.

Brooks ha sugerido que robots móviles diminutos, de peso no superior a un kilogramo, podrían encargarse de tareas como la exploración del suelo de un planeta distante (o del nuestro) con mayor eficacia que otros sistemas mayores, individualmente más fiables.

Trabajando según estas directrices, Maja Mataric, estudiante posgraduada del MIT, ha preparado un módulo de programas que produce un mapa "estilo subsunción" de las inmediaciones del robot. En lugar de la estructura de datos habitual, que contiene objetos y sus ubicaciones, o quizás, incluso, la visión del mundo ofrecida por un sensor de robot, el mapa de subsunción consiste en una colección de pequeños procesos de computación, uno de los cuales resulta activado por cada lugar "interesante" del mundo del robot.

Maes ha diseñado una arquitectura basada en subsunción, que da cabida incluso a "creencias" y "motivaciones". Un robot inspirado en sus diseños sería potencialmente capaz de responder a la pregunta "¿Por qué ha cruzado Atila la calle?". El robot podría decirle a un ser humano dónde creía que se hallaba un objeto particular o cuál fue el motivo de haber pasado de una sala a otra. De forma muy similar a la de los agentes de "comportamiento" que dirigen las conductas de "recogida" o ambulación, los agentes de "creencias" de la llamada red arquitectónica de agentes ideada por Maes gobiernan a alto nivel las acciones del robot. Por ejemplo, un agente de creencia "batería descargada" podría suprimir la exploración en favor de una conducta de "retorno a la base".

Como era de prever, la postura frente a Brooks de los creadores de sistemas más convencionales y menos fotogénicos es a lo sumo compasiva, cuando no francamente hostil. Cuando se le exigió una opinión a Nils J. Nilsson de la Universidad de Stanford —que había dirigido veinte años atrás los trabajos de IA en SRI International, en los tiempos de Shakey, el primer robot móvil— recurrió a las palabras de W. H. Auden: "Quienes no razonen / perecerán en la acción; / quienes no actúen / perecerán por esa razón."

Mitchell es menos diplomático. Brooks y sus colegas, dice, "son muy seductores, pero sus ideas son desastrosas". Aunque admite que el equipo de Brooks ha tenido "un éxito sorprendente en la construcción de sistemas que se comportan bien", Mitchell sostiene que la arquitectura de subsunción es más adecuada para construir termostatos que agentes con inteligencia.

Uno de los comentarios más favorables proviene, empero, de Newell, cuya arquitectura SOAR es la apoteosis de razonamiento elegante y de representación del conocimiento. Newell sostiene que la diferencia entre SOAR y la subsunción no es en realidad tan grande, pues SOAR opera fundamentalmente por estímulos y respuestas, excepto cuando sus reglas le llevan a un callejón sin salida. Newell alaba la noción de "reactividad" que ve en los pequeños insectoides.

Tanto si Atila y su ralea saltan a la

Explosión de la paradoja

El barbero afeita a todo hombre que no se afeite a sí mismo. ¿Quién afeita al barbero? Bertrand Russell, con estas sencillas frases, demolía la aparente perfección de la lógica de predicados y de la teoría matemática de conjuntos. La paradoja del barbero (o para quienes gusten de la teoría de conjuntos, del conjunto de todos los conjuntos que no son elementos de sí mismos) sirve de ilustración de las paradojas que se pueden dar cuando se permite que unos enunciados hagan alusión a la veracidad de otros.

Esta vieja paradoja sigue interesando a quienes investigan en inteligencia artificial, porque casi todos sus programas se asientan firmemente en la inferencia lógica. Las leyes de la lógica nos muestran que de una contradicción se puede deducir lo que se quiera; por lo tanto, la posibilidad de paradojas es en IA claro anuncio de desastres.

El ensalmo reza como sigue: si "A" es un enunciado verdadero, obviamente lo es el enunciado "A o B". Por otra parte si "A" es falso y "A o B" es verdadero, entonces "B" ha de ser verdadero. Una contradicción consiste en afirmar que "A" es verdadero y "A" es falso; por consiguiente "B" tiene que ser verdadero, afirme lo que afirmare.

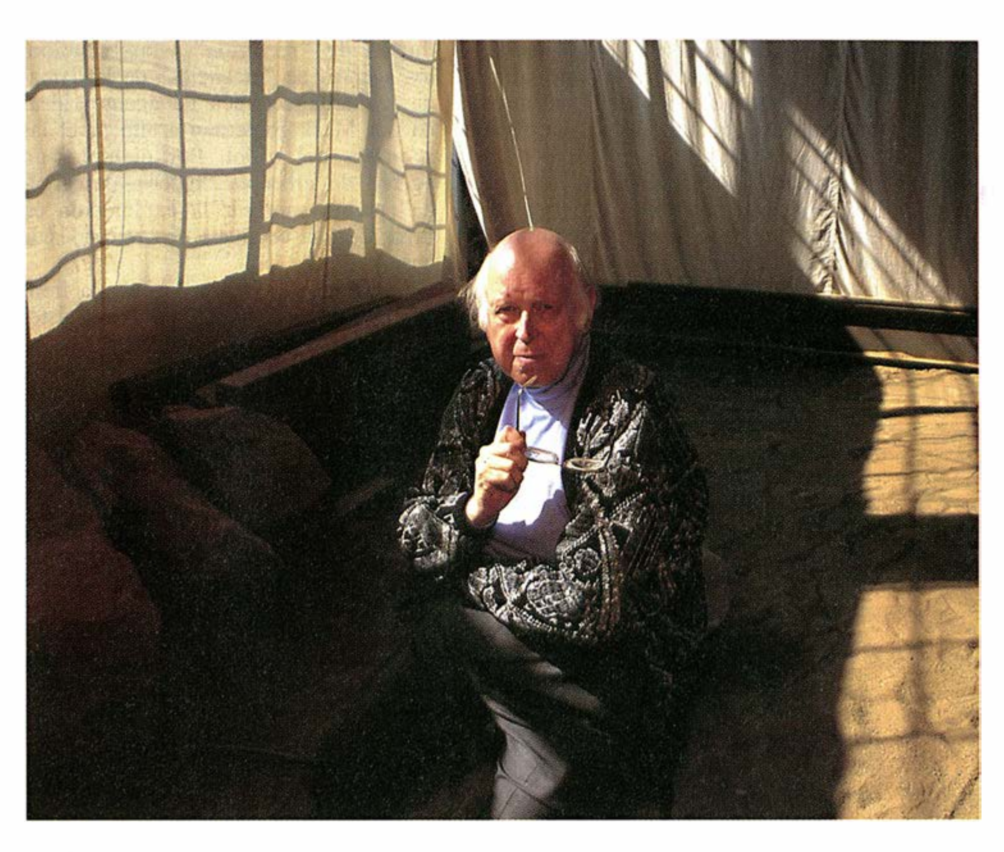
Según Stuart C. Shapiro, de la Universidad de Nueva York, dos son las vías para salir del aprieto. Una, la elegida por las matemáticas, es la lógica de predicados de primer orden, que no consiente enunciados que aludan uno al valor de verdad del otro. No hay paradojas, pero el sistema es incompleto, como demostró Kurt Gödel en la generación siguiente a Russell. Un enunciado puede ser manifiestamente verdadero, pero imposible de demostrar en términos formales.

La otra vía consiste en imponer restricciones arbitrarias (hablando en términos lógicos) sobre lo que es relevante, a fin de que las deducciones no puedan tornarse sin más en regresiones infinitas, explica Shapiro. Por ejemplo, el conocimiento de que la Luna es y no es a la vez de queso verde podría llevar a un autómata razonador a conclusiones extravagantes sobre las muestras del suelo lunar, pero no debería permitir que la máquina concluyera que el color del cielo determina las tarifas de transporte de la grasa de yak tibetano.

Es irónico que la estructura de los sistemas sencillos de razonamiento automático impida por sí misma tales disparates. Estos programas no tratan nunca de razonar a partir de elementos que no estén directamente relacionados entre sí. Tan sólo los programas más refinados y completos pueden, tras un prolongado y arduo trabajo de sus autores, enlazar hechos que no guardan relación alguna y hacer explosión al toparse con una contradicción.

fama como si son disparates conducentes a una vía muerta filosófica, o ambas cosas, los trabajos de Brooks plantean algunas cuestiones fundamentales sobre la naturaleza de la inteligencia. ¿Qué sentido tiene decir que un sistema sabe algo? ¿Basta que el sistema se comporte como si supiera que no debe tropezar con las paredes, o será preciso que posea cierta representación explícita de ingeniería estructural?

Tal vez a los investigadores les resulte más sencillo pensar mediante proposiciones lógicas e inferencias, opina Rosenschein, pero eso no significa que todo cuanto una máquina contenga haya de ser representado en forma lógica explícita. "Ciertas personas se dejan impresionar por la precisión de los lenguajes lógicos y por la capacidad de éstos para encadenar unos hechos con otros", opina. Pero en las máquinas reales, la elegancia ha de ceder paso a la eficiencia. Determinar la veracidad de una proposición lógica constituye un problema "NP-difícil", en principio imposible de resolver en un tiempo razonable: nada adecuado para ser computado por un robot móvil.



3. ALLEN NEWELL *(izquierda)* Y JOHN E. LAIRD, de las universidades Carnegie-Mellon y Michigan, respectivamente, son los dos principales arquitectos de SOAR, un sistema integrado de razonamiento que ahora se acerca a su décimo aniversario. Variantes del sistema permiten controlar

El problema, sostiene Rosenschein, es que en la búsqueda de elegancia lógica los investigadores mezclan hechos estáticos, que son siempre verdaderos, con información dinámica concerniente al estado inmediato del mundo. Conviene la representación explícita para los hechos que pueden variar, como por ejemplo, las personas que ocupen ahora cada despacho o que la puerta del ascensor esté o no abierta; en cambio, no se requiere la codificación explícita de otros hechos, como la gravedad o la impenetrabilidad de los objetos materiales: basta que el sistema actúe como si los conociese. Rosenschein y sus colaboradores han preparado instrumentos informáticos capaces de integrar conocimientos estáticos en la estructura de un sistema autónomo.

No obstante, el proyectista de una máquina inteligente tiene que decidir cuáles son los conocimientos que el sistema aparente poseer y en qué forma han de quedar representados tales conocimientos, lo que entraña problemas de solución todavía lejana. Así, por ejemplo, la lógica tradicional sirve para representar hechos, pero no creencias ni intenciones relativas al mundo o a los resultados de acciones concretas, dice Stuart C. Shapiro, de la Universidad de Nueva York en Buffalo. Otros formalismos más ricos comportan el riesgo de suscitar paradojas que hagan doblar la rodilla a cualquier ingenio razonador, advierte.

Además, añade Shapiro, las lógicas de la creencia y de la acción no son idénticas. En la programación basada en la lógica tradicional, como el lenguaje PROLOG, lo típico es que una creencia se forme una sola vez, incluso aunque sea utilizada como paso lógico en varias cadenas de razonamientos distintas. De aplicar a las acciones tales medidas de economía podríamos concluir, por ejemplo, que no necesitamos andar para salir de casa por la mañana, puesto que ya habíamos andado antes para ir al cuarto de baño.

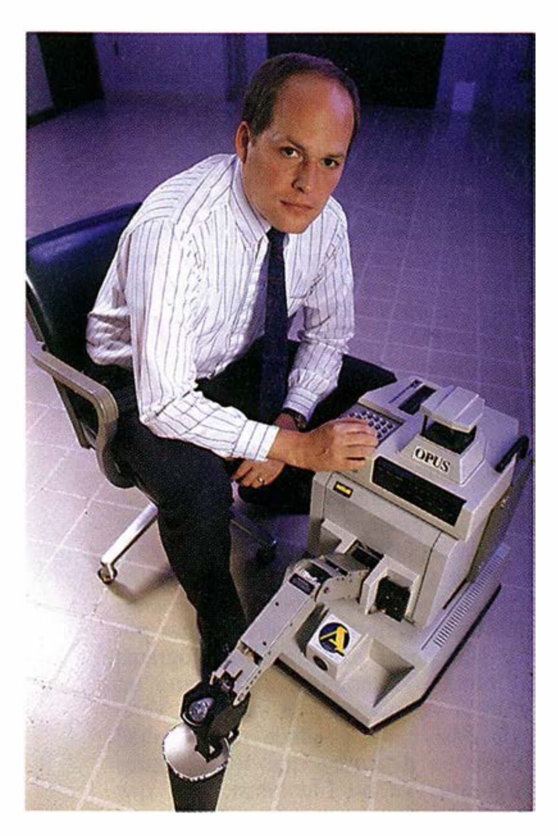
En los agentes inteligentes desempeñan un papel esencial las representaciones lógicas capaces de habérselas tanto con acciones como con creencias. Tales máquinas no sólo estarán obligadas a razonar sobre las consecuencias de las acciones propias, señala Shapiro, sino que tendrán también que comprender y representar las creencias y acciones de personas y de otros agentes inteligentes. Por ejemplo, "Juan cree que María cree que el programa falla; aunque Juan cree que el programa no falla, en realidad María tiene razón."

Estas regresiones lógicas se hallan reflejadas en el trabajo de Thomas Dean, de la Universidad Brown, entre otros. Los sistemas de Dean no sólo planifican sus acciones, sino que además cuantifican la planificación que han de hacer. Quienes reflexionan sobre estos "algoritmos de todo momento" tienen dolorosa conciencia de que los recursos computacionales no son infinitos y de que las máquinas, al igual que las personas, sólo pueden ejercer lo que Herbert A. Simon denomina "racionalidad acotada".

Pellas de conocimiento

En última instancia, las técnicas de razonamiento que produzcan respuestas exactas de nada servirán a las máquinas que hayan de operar en "tiempo real". (También la definición de tiempo real es materia de controversia, pero Mitchell nos ofrece como criterio práctico que el tiempo dedicado a pensar una acción no debería durar, en general, más que la propia acción.) La verdad es que las técnicas de razonamiento que producen rápidamente respuestas aproximadas pueden no servir tampoco de nada si no es posible interrumpirlas a medio proceso. Como saben todos quienes hayan visto en trance la caída de algún objeto precioso, prácticamente cualquier acción es preferible a la inacción.

Los partidarios de tal metaplanificación propenden a utilizar algoritmos basados en el "refinamiento iterativo", que van produciendo respuestas más perfectas en cada nueva ejecución sucesiva de los mismos. Sabiendo en qué medida mejoran las respuestas con el tiempo y el costo de las demoras, el sistema puede decidir cuánto tiempo debe dedicar a pensar antes de actuar.



robots móviles, comprender inglés ordinario y llevar a cabo otras diversas tareas más o menos prácticas.

Existe, empero, y así lo admite Dean, otro nivel de regresión: el optimizar la cantidad de tiempo dedicado a la planificación constituye en sí mismo un problema insoluble: en consecuencia, el metaplanificador forzosamente ha de efectuar aproximaciones, o de lo contrario, planificar cuánto tiempo ha de dedicar a planificar el tiempo que ha de dedicar a planificar... y así, hasta el infinito.

Dean ha demostrado matemáticamente que la regresión lógica "acaba por tocar fondo", aunque reconoce que las máquinas inteligentes basadas en sus algoritmos se encuentran todavía en periodo de formación, "en el preciso estadio en que son capaces de ir hasta el fondo de la sala sin dejar grandes desconchones en las paredes". Dean pronostica que probablemente hasta el final del decenio no serán mayoría los sistemas reactivos y los sistemas de planificación que dejen de aplicar métodos empíricos para la asignación de recursos de computación.

Un esquema lógico así, relativamente sencillo, constituye la "sesera" de SOAR, sistema lógico que el grupo de Newell lleva casi nueve años experimentando, encarnado de diversas formas. SOAR se funda en dos técnicas: exploración y "formación de pegotes".

Cuando el sistema ha de afrontar un problema comprueba si es aplicable alguna de las reglas de su base de conocimientos y desencadena una ristra de deducciones, hasta que no puede proseguir. Si el problema queda resuelto, estupendo; si no, SOAR (que durante un tiempo significó State, Operator And Result), para salir del punto muerto, determina un "ámbito del problema", en el seno del cual inspecciona todas las posibles soluciones valiéndose, si dispone de ellas, de técnicas al caso y del examen por la fuerza bruta en el caso contrario. Una vez que SOAR ha encontrado una solución, generaliza la técnica utilizada en ella y compila dicha técnica en una "pella", esto es, una regla que será activada la próxima vez que se presente una cuestión parecida, eliminando así la pesada tarea de la búsqueda de soluciones.

Un ejemplo perfecto de esta técnica es el módulo de SOAR para comprensión del lenguaje natural, llamado NL-SOAR, que aplica el operador "comprender esta palabra en contexto" a cada nueva palabra introducida, saca de ella conclusiones y crea un nuevo pegote de conocimiento. Según John E. Laird, de la Universidad de Michigan, quien desarrolló SOAR con Newell y otros, NL-SOAR comienza con unas 900 reglas y expande su base de conocimiento a más de 1500 apenas ha comprendido unos pocos cientos de palabras más. Newell proclama que el sistema es capaz, en principio, de aprender indefinidamente nuevas palabras y reglas, y habla de hacerlo funcionar un mes seguido sin interrupción, "añadiendo conocimiento por procedimientos interesantes".

Sin embargo, Newell entonces retrocede e indica que, en su versión actual, no puede asegurarse que el sistema no se atasque antes de un par de horas, por un fallo que reside en algún lugar de las reglas iniciales, codificadas a mano, que los humanos han introducido en el sistema. Por alguna razón, la estructura de estos pegotes provoca un mal aprendizaje. Contrariamente a lo que se podría esperar, señala Newell, cuantas menos reglas introduzcan las personas y más tenga SOAR que aprender por sí mismo, tanto mejor funcionará.

Además del sistema de lenguaje natural, SOAR ejecuta también dos aplicaciones robóticas: RoboSOAR, un brazo de robot, y HeroSOAR, un robot móvil que depende de un módulo de visión independiente para determinar en dónde residen los pequeños objetos de su espacio de trabajo, robot que es capaz de realizar tareas sencillas, como recoger bloques y apilarlos. HeroSOAR investiga su entorno mediante sensores ultrasónicos, prestando especial atención a los objetos que parezcan ser cubos de basura.

En última instancia, dice Laird, todos los módulos de SOAR serían integrados en uno solo. Los robots podrían aceptar órdenes expresadas en inglés corriente y responder en este idioma al tiempo que ejecutan sus tareas. Los investigadores tendrán, empero, que resolver antes ciertos problemas relativos al sistema de visión y otros módulos.

La forma en que el soporte lógico de la visión analiza la escena no siempre encaja con la información que podrían necesitar los que se encargan de la resolución de problemas en SOAR. Además, la cámara va montada directamente sobre el espacio de trabajo del robot, con lo que RoboSOAR no puede realmente ver lo que está haciendo. El sistema tiene que analizar una escena, mover su pinza y tratar de recoger objetos, y apartar después la pinza para averiguar si ha tenido éxito. Se asemeja algo a un humano, con las manos forradas de gruesos mitones, que intentara jugar al ajedrez con sólo tomar una instantánea del tablero, decidir cuál va a ser su jugada y después, con los ojos cerrados, echase mano a la pieza para moverla.

También el sistema THEO, de Mitchell, se vale de una arquitectura conceptualmente similar a la de SOAR, cuya idea es "compilar tras planificar". Mitchell sostiene que no basta con la mera integración: la clave reside en la organización. De no disponer de algún método para centrarse en lo importante del caso de que se trate, cualquier programa se atascará. "Aprendimos enseguida que un sistema con cinco reglas funciona bien; con cinco mil, en cambio, irá sin remedio a paso de tortuga." (Newell refiere idéntica experiencia con SOAR. Puede suceder que la adición de un solo "pegote costoso" a la base de conocimientos provoque una reacción en cadena de procesos lógicos, capaz de dividir por cuatro la velocidad del programa.)

Además de atiborrar el espacio de memoria, gran parte de lo que el sistema aprende examinando ejemplos, aunque verdadero, puede ser irrelevante e incluso inducir a error. Mitchell asimila el problema a una versión automatizada de los "cultos al avión", que llevaron a los isleños del Pacífico a construir pistas de aterrizaje y remedos de aviones de madera para atraer hacia sí desde los cielos los bienes y el saber de Occidente.

El proceso de "formación de pegotes" puede acelerar la ejecución de planes, dice Mitchell, pero no por eso éstos son más correctos. Habrá fallos ocasionales si el plan se funda en una incorrecta comprensión del mundo. Lo ideal sería que un sistema inteligente aprendiera de sus propios fallos, pero es difícil conseguir que aprenda qué

es lo correcto. "No existe modelo perfecto para los efectos de ciertas acciones", dice Mitchell, así que la mejor táctica puede ser dejar que THEO falle de vez en cuando y tratar de recuperarlo de tales fallos, en lugar de intentar de prever de antemano todo lo que podría salir mal.

Convergencia de la IA y la realidad virtual

Una de las exigencias en las que hace hincapié Mitchell cuando habla de permitir que THEO y otros agentes inteligentes "experimenten" con el mundo que les rodea es que ni el robot ni sus sujetos han de sufrir daño alguno. Por este motivo, algunos expertos en agentes inteligentes han creado simulaciones computarizadas para ensayar los programas que habrán de constituir la mente de sus máquinas autónomas.

Uno de los moradores del país del simulacro que más impresionan a otros investigadores es Homer. Construido por Steven A. Vere, del Centro de Inteligencia Artificial de Lockheed, en Palo Alto, Homer es un submarino virtual que habita en un mundo acuático junto con barcos, peces, ballenas, otros submarinos, minas, boyas, aves, islas, muelles y personas.

Homer comprende unas 800 palabras y es capaz de efectuar tareas de múltiples etapas, del tenor siguiente: "Lleva la boya roja al muelle antes de mediodía y reúnete después con Roger en el rompeolas mañana por la mañana." Sabe solicitar información a la gente cuando ignora dónde está algo y rastrea continuamente los acontecimientos de su entorno.

De hecho, la impresión resultante de una sesión con Homer guarda fuerte parecido con la transcripción de un día pasado con un niño precoz de tres años:

"Veo un pájaro marrón sobre el tronco gris."

"Hay dos veleros junto a la isla."

"El *Smirnov* acaba de volverme a adelantar por la derecha."

"He llegado al dique seco."

"Homer, tráeme la boya de Fred."

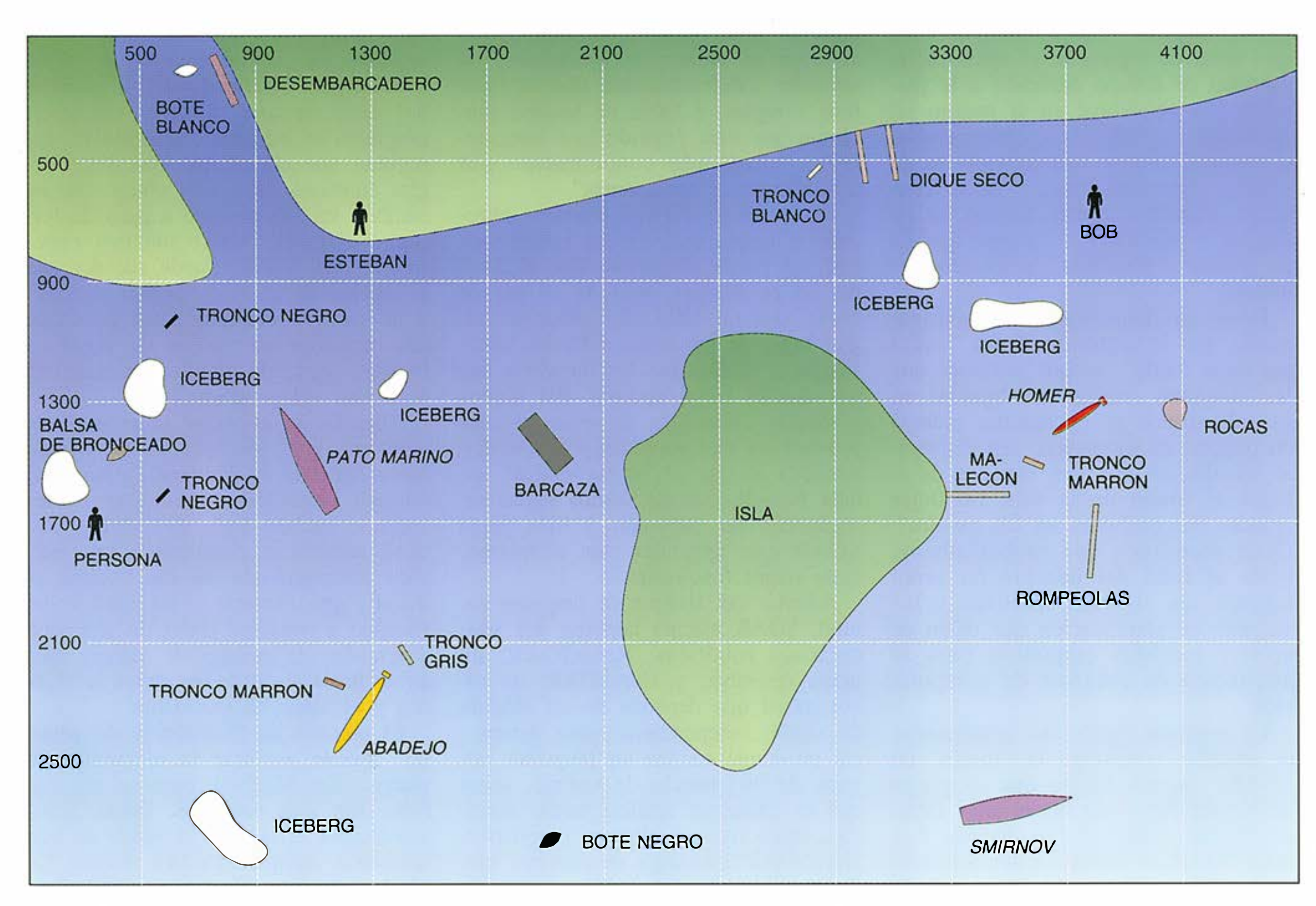
"Ahora voy hacia Fred."

"Fred, ¿dónde está tu boya?"

Vere admite que trabajar en un mundo simulado ha simplificado en gran medida su trabajo; no obstante, insiste en que muchas de las facultades de Homer podrían ser transferidas a un minisubmarino real, y en particular, afirma que la extraordinaria agudeza de la visión simulada de Homer no resulta demasiado descabellada, toda vez que el medio marino contiene un conjunto tan reducido de objetos que incluso un sistema de visión bastante simple sería capaz de distinguir entre peces, ballenas, barcos, veleros, troncos, aves y masa terrestre. Homer sería todavía más competente si se hallara en un ambiente artificial de parecido diseño (aunque geográficamente más dispar) como una estación espacial, en la que todos los objetos podrían ser marcados e identificados sin ambigüedad.

A primera vista, Homer parece constituir un éxito para las arquitecturas inteligentes integradas. Es capaz de planificar sus acciones, de responder a las contingencias modificando sus planes y puede interactuar con otros. La travesía, empero, no es tan plácida bajo la superficie, explica Vere. Homer es lento y su memoria ineficaz; cuanto más tiempo viva, mayor será su lentitud. Basta concatenar entre sí unas pocas situaciones para llevar al programa al borde del colapso. "Es como un castillo de naipes", se lamenta Vere. "En cuanto se le añade una facultad nueva se descubre que los antiguos supuestos ya no funcionan. Hay que retroceder y volver a ajustarlo."

La vida de Homer se encuentra también amenazada por restricciones presupuestarias de su empresa y por la gradual extinción de su equipo de in-



4. UN MUNDO MARINO simulado constituye el dominio de Homer, agente inteligente construido por Steven Vere, del Centro Lockheed de Inteligencia Artificial. Homer comprende órdenes sencillas en inglés ordinario y es capaz de hacer planes para cumplirlas.

vestigadores. Timothy W. Bickmore, colega de Vere, salió de Lockheed hace un año y en la actualidad la compañía sólo permite a Vere que dedique al proyecto la mitad de su tiempo. Aunque mediante nuevos equipos informáticos se ha podido mejorar el tiempo de reacción de Homer desde lamentable a tolerable (30 segundos para planificar un proceso de actuación sencillo, frente a los varios minutos que antes tardaba), el sueño de trasplantarlo a un minisubmarino real se mantiene en un suspenso indefinido.

En la misma calle que Vere, en el Centro Ames de Investigación de la NASA, existe otro agente simulado con más firme asentamiento. El Ingenio de Reducción de Entropía (Entropy Reduction Engine, ERE) de Mark E. Drummond es un modelo conceptual para la clase de robot que podría un día ayudar a mantener estructuras en órbita o en la superficie de la Luna.

Por el momento, ERE mora en el Mundo de Losetas, una Planilandia reticulada que contiene un número arbitrario de losetas poligonales. Este mundo se encuentra agitado por vientos capaces de arrancar de su sitio losetas, y los esfuerzos del robot por moverlas o asirlas con una o varias de sus cuatro pinzas pueden fallar. Pese a la sencillez del entorno, éste proporciona diversidad más que suficiente para tratar la mayoría de problemas esenciales en planificación y control, dice Drummond.

ERE consta de componentes que fragmentan los problemas en formas más sencillas, evalúan posibles soluciones y compilan reglas que las llevan a efecto. Su diseño no sólo atiende al logro de objetivos, como podría ser ensamblar losetas en una cierta configuración, sino también a las que Drummond llama "restricciones conductuales"; por ejemplo, asegurarse de que una determinada estructura de losetas se mantiene intacta aun bajo la influencia de vientos. En última instancia, como es obvio, a Drummond le gustaría poder generalizar tales limitaciones conductuales para construir un tipo de robot al que pudiera decírsele: "Mantén la estación espacial en estado operativo. Esta es la lista de lo que puede fallar. Aquí tienes las herramientas y otros materiales."

No obstante, el interés de Drummond por el mundo de losetas trasciende de su propia investigación. Tiene la esperanza de elevar este sencillo entorno simulado a una norma con la cual los diseñadores de los distintos agentes inteligentes puedan comparar sus rendimientos en distintas tareas estándar y comprender así cuáles son las flaquezas y los puntos fuertes de diversas arquitecturas. El Centro Ames de la NASA, juntamente con Teleos, de Rosenschein, han obtenido un contrato de investigación con la Agencia de Proyectos Avanzados de Defensa, cuya finalidad es definir un sistema de bancos de prueba para sistemas inteligentes integrados.



5. DOUGLAS B. LENAT, "niño prodigio" de MCC, ha sido el instigador de Cyc, un proyecto de codificación del sentido común, cuya duración estimada es un decenio. En su nacimiento, hace siete años, muchos expertos en IA estimaron que Cyc era casi una chaladura.

En un extremo del espectro de inteligencia y acción corretean huidizos los robots insectoides de Brooks; ocupan el centro docenas de sistemas, como los construidos por Vere y Drummond, que poseen diversos niveles de conocimiento y capacidad. En el otro extremo se aposenta mayestático el Cyc de Douglas B. Lenat, que lo sabe casi todo —1,43 millones de hechos interconectados, según el último recuento— pero no hace casi nada de nada. La verdad es que muchos cuestionarían la inclusión de Cyc en una lista de sistemas inteligentes integrados, porque en esencia no es más que una enciclopedia automatizada (y de ahí proviene su nombre).

Concebir a Cyc como una entidad (aun cuando, al igual que SOAR, se aproxime a su primer decenio de estancia en esta tierra) tropieza con el problema de que no tiene auténtico sentido de sí mismo, dice Patrick Hayes, de Stanford. Hayes, que preside la Asociación Americana para la Inteligencia Artificial, fue durante breve tiempo director de la oficina de Cyc en la Costa Oeste de EE.UU. hasta que diferencias de concepto con Lenat le decidieron a transformarse en consultor del sistema. "Cyc sabe que hay una cosa llamada Cyc, y sabe que Cyc es un programa de ordenador", dice Hayes, "pero no tiene ni idea de que *él* es Cyc."

Aun así, el programa es muy notable. El MCC, consorcio de 56 compañías de tecnología informática que tiene a Lenat en su plantilla, ha invertido en Cyc el equivalente de 500 años-programador. Es probable que todavía quede por delante otro tanto de trabajo para alcanzar —en 1994 o 1995 según el esperanzado cálculo de Lenat— el punto de equilibrio estimado en unos diez millones de hechos. A partir de ese momento, Cyc podrá recoger información más rápidamente por lectura que por la alimentación dosificada que le entregan ingenieros del conocimiento. Una base de información más amplia podría también proteger a Cyc de pifias como la conclusión de que todos los humanos son amigos de Doug Lenat, basada en todas las personas de las que el sistema tenía noticia.

No hay camino real

El programa ha sido concebido para que posea la clase de conocimientos que podría necesitar un agente inteligente para desempeñar sus tareas: qué son las personas, los árboles y los autobuses, de qué manera interactúan, cómo caen al suelo y se rompen los objetos, cómo funciona una bombilla eléctrica. Lenat imagina el día en que Cyc atenderá las peticiones de conocimientos de sentido común que puedan formularle programas para la comprensión del lenguaje natural o sistemas expertos que traten de mantener comportamientos razonables al aproximarse a los límites de su campo de pericia.

Pudiera ser que Cyc llegase incluso a ayudar a los humanos a decidir la clase de automóvil a comprar. Prácticamente todo podría revestir importancia, desde los cambios de rol en las familias modernas hasta las proporciones relativas de multas de tráfico impuestas a los autos de color azul marino o de color rojo furioso.

Pese a su gran tamaño, dice Lenat, Cyc es "ingeniería de fregadero". Todo cuanto sabe viene expresado de dos formas bien distintas: primero, en "lenguaje epistemológico", claro y elegante, y después, por segunda vez, a nivel heurístico "en un saco revuelto de diferentes representaciones", diseñadas para que las inferencias sean más rápidas en una determinada categoría de hechos. El sistema contiene hasta el momento 27 ingenios inferenciales especializados, y Lenat tiene el propósito de añadir más a medida que sean necesarios.

Según Lenat, Cyc consigue así esquivar el compromiso entre expresividad y eficiencia. Valiéndose, por ejemplo, de "un juego de herramientas compuesto por soluciones parciales", Cyc ha resuelto problemas relativos al tiempo, el espacio, la causalidad, las creencias y las intenciones que han hecho fracasar a otras inteligencias artificiales. "Casi toda la potencia —positiva o negativa— de las arquitecturas inteligentes integradas provendrá del contenido, no de la arquitectura", asevera Lenat.

En opinión de Lenat, la idea de que una particular estructura de algoritmos llegue a posibilitar la conducta inteligente es mera aspiración sin fundamento. "La inteligencia consiste en 10 millones de reglas. No nos ayuda mucho tener una representación de conocimientos medio decente y una arquitectura un cuarto decente", opina. Los investigadores que esperan poder resolver con una única y elegante teoría todos los problemas de inferencia y de representación de conocimientos, padecen de "celos de la física". "Ansían una teoría que sea pequeña, elegante, potente y correcta, y por ello, se dedican a ensayar tácticas gratuitas, una tras otra."

Tanto debate filosófico y todo el talento ingenieril empleado puede parecer un poco excesivo para recoger vasos de poliestireno del suelo del laboratorio —suponiendo, desde luego, que no estén encolados a él. ¿Cuándo llegarán los sistemas inteligentes a rebasar la barrera de las 24 horas de vida y de qué forma lo conseguirán?

Podemos sentirnos tentados a creer que el progreso natural en el mágico mundo de los semiconductores acabará permitiendo resolver "por la fuerza bruta" los problemas de percepción y razonamiento. Después de todo, como dice Newell, "de no ser porque las estaciones de trabajo han estado duplicando su potencia año tras año, ya estaríamos muertos". Los microcircuitos (chips), cada vez más rápidos y menos costosos, han puesto ya al alcance de casi todos los grupos de investigación robots móviles provistos de cámaras.

Newell admite, sin embargo, que los progresos en integración de circuitos no han hecho, en el mejor de los casos, sino mantener proyectos grandes como el SOAR unos pasos por delante de los matarifes. No siente ningún entusiasmo al pensar en la calidad de funcionamiento de sistemas provistos quizás de 200.000 reglas en lugar de unos pocos y miserables millares de reglas que hoy ejecutan sus máquinas. Mitchell coincide con esa opinión: "Quisiéramos pensar que el silicio va a salvarnos, pero no será así."

La respuesta, por el contrario, tal vez no tenga más complejidad que la de trabajar intensamente y dar tiempo al tiempo. Por su misma naturaleza, señala Newell, los sistemas inteligentes integrados son de una gran polivalencia, y no se encuentran en la vanguardia de ningún sector concreto de la inteligencia artificial. Y ahora que han madurado la planificación, la comprensión del lenguaje natural y otras disciplinas, como opina Newell, "es preciso andar un largo camino para llegar a la frontera". Pero si los expertos en inteligencia artificial se deciden a comprometerse a proseguir su labor mucho más allá de la duración de una subvención o de un ciclo de estudios de posgrado, tal vez sus bebés de silicio puedan crecer hasta habitar en organismos capaces de trabajar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REFERENCE FRAMES FOR ANIMATE VISION. Dana H. Ballard en *Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence: Proceedings*. Morgan Kauffmann Publishers, 1989.

DESIGNING AUTONOMOUS AGENTS: THEORY AND PRACTICE FROM BIOLOGY TO ENGINEERING AND BACK. Dirigido por Pattie Maes. MIT/Elsevier, 1990.

UNIFIED THEORIES OF COGNITION. Allen Newell. Harvard University Press, 1990.

INTELLIGENCE WITHOUT REASON. Rodney A. Brooks en *Twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence: Proceedings*. Morgan Kauffmann Publishers, 1991.

SPECIAL SECTION ON INTEGRATED COGNITIVE ARCHITECTURE (Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Integrated Intelligent Architectures) en *ACM SIGART Bulletin*, vol. 2, n.º 4, págs. 2-184; agosto de 1991.

Ciencia y empresa

Seguridad

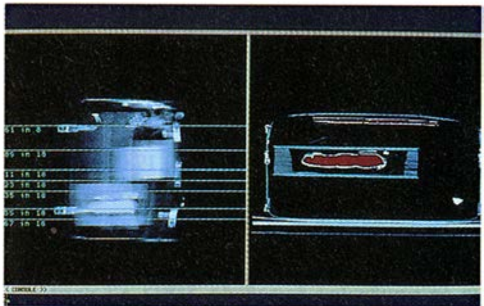
Medios contra el terrorismo aéreo

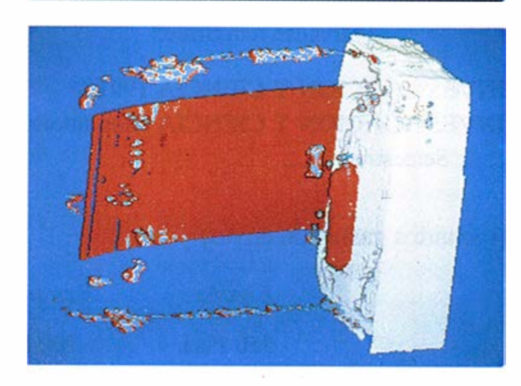
El oficial de policía o guardia civil que se pasa el santo día en el aeropuerto mirando imágenes de rayos X de latas de crema de afeitar y secadores portátiles no necesita otros alicientes para caer en la modorra y el aburrimiento. Son muchos los países interesados en redoblar la seguridad de sus aeropuertos, como debiera ser el caso de España, de forma especial este año de juegos olímpicos y otras celebraciones. Más de diez años lleva la Administración Federal de Aviación (FAA) de los EE.UU. intentando mejorar la confianza de la inspección automática de equipajes y buscando medios más efectivos de detección de bombas que los aparatos de rayos X convencionales. La presión interna adquirió fuerza determinante tras el atentado contra el vuelo 103 de la Pan American, convertido en pavesas en la explosión del 21 de diciembre de 1988, en los cielos escoceses de Lockerbie.

La FAA afirmó en septiembre de 1989 que el análisis mediante neutrones térmicos (TNA) era el único sistema fiable. (El TNA bombardea el equipaje con neutrones, haciendo que los explosivos plásticos, ricos en nitrógeno, emitan rayos gamma de una energía característica.) Pero el apoyo inicial de la FAA a esta técnica, que hubiera significado contratos millonarios para los fabricantes, parece ahora precipitado y se están plegando velas. El TNA titubea cuando debe detectar cantidades pequeñas de explosivos plásticos, las que acabaron con el vuelo 103 de Pan Am. Calibrado para fracciones irrelevantes, el mecanismo se dispara con una razón desproporcionada de falsas alarmas. Algunos informes muestran que hasta un tercio o más de los pasajeros perderían el enlace en vuelos internacionales si se aplicara a su equipaje el TNA.

La legislación norteamericana vigente exige que la FAA desarrolle un programa de pruebas en consulta con expertos de fuera antes de dar su aprobación al TNA o a cualquier otro sistema de detección. La ampliación del proceso de selección ha desencadenado una batalla tecnológica entre distintos equipos de detección de vapor o de creación de imágenes, que son candidatos potenciales para un prometedor mercado de 1000 millones de dólares. El servicio de investigación y desarrollo de seguridad en la aviación de la FAA, con casi tres veces el presupuesto y cuatro veces el personal que tenía antes de Lockerbie, ha concedido más de 25 contratos para investigar la detección de aparatos electromagnéticos o de vapores.







LAS BOMBAS EN LA BOLSA DE VIAJE se descubren empleando exploración convencional bidimensional con rayos X (arriba), *seguida de tomografía computerizada bidimensional* (centro) *y tridimensional* (abajo). *Fotos: Imatron.*

La empresa Scan-Tech Security y la Universidad Rutgers han sido beneficiadas con un contrato para desarrollar un prototipo de un sistema de inspección mediante rayos X coherentes semejante a la cristalografía de rayos X, que identifica los espectros producidos cuando un material se ilumina con rayos X. Una red neural, soporte lógico empleado en reconocimiento de formas, puede comparar luego esos sellos espectrales con una base de datos de explosivos sólidos conocidos.

Otro contrato se otorgó a Imatron Federal Systems, para la creación de una versión de alta velocidad de un equipo de exploración por tomografía computerizada (CT). Igual que en los modelos de aplicación hospitalaria, el explorador CT proporciona imágenes de cortes del objeto a cualquier profundidad, y permite echar un vistazo al interior de una radio o libro dentro de una maleta. El ordenador compara la densidad y otras medidas del material con una base de datos deducida de medidas CT de más de 100 tipos diferentes de explosivos.

Al solicitar y someter a prueba más ideas de las que aplicará, la oficina gubernamental se está curando en salud. A pesar de todos esos frentes abiertos, no resulta fácil descubrir la presencia de una bomba en una maleta. Lee Grodzins, profesor de física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y experto en explosivos, pone un punto de ironía al afirmar que el fruto más apreciado del TNA ha sido el demostrar cuán difícil resulta el reconocimiento de formas y materiales dentro de una maleta cerrada. "Tienen que hacer en seis segundos lo que es difícil de hacer en dos horas en el laboratorio", señala.

Esta es la razón por la que, cualquiera que sea la técnica finalmente escogida, deberá, combinarse con la clase de perfiles psicosociales y métodos de identificación de equipajes que realiza rutinariamente la línea aérea israelí El Al. El experto en perfiles puede preguntar si los pasajeros son un matrimonio anciano de Salamanca que compró sus billetes con dos meses de antelación, o si se trata de un joven con sólo el billete de ida pagado al contado escasas horas antes de la salida. El equipaje de este último pasajero se revisa mucho más minuciosamente.

¿Da dos veces quien da primero?

Ha llegado la hora de la biología", proclamó Peter J. Farley, cuando fundó Cetus en los años iniciales de la carrera biotecnológica, que comenzó en los primeros ochenta. Los científicos, embutidos en su bata blanca, apilaban descubrimiento sobre descubrimiento, el capital de riesgo circulaba con alegría y las ofertas públicas se las rifaban inversores impacientes. Robert Swanson, creador de Genentech a los treinta y pocos, se convirtió en espejo donde mirarse el nuevo hombre de negocios que, a su imagen, esperara elevar a mil millones de dólares el volumen de negocios de la compañía en unos años.

La realidad fue otra. Genentech, que arrancó con la fabricación del primer fármaco capaz de enlazarse a un gen (insulina humana) y continuó con un disolvente de trombos cardiovasculares (t-PA), entró en la nueva década vendiendo a Hoffman-La Roche acciones suficientes para ceder el control. Cetus, que elaboró una importante técnica para fabricar almiares de ADN a partir de pajuelas unicatenarias, nunca consiguió comercializar ningún medicamento. La ballena del logotipo se la tragó, el verano de 1991, una empresa joven, Chiron. En esa misma onda, Genetics Institute, Inc., respetada por su habilidad comercializadora, perdió una batalla de patentes con un competidor, para después entregarse a American Home Products.

La lista de ejemplos sigue. Pero no enterremos todavía aquellos sueños de gloria y expansión. El t-PA de Genentech (activador de plasminógeno hístico) aportó 210 millones de dólares en 1990, y aunque las ventas han ido cayendo ante la crítica de que otros fármacos menos caros poseen idéntica eficacia, la droga desencadenó una cascada de investigaciones sobre la formación de trombos en la sangre. Cetus no allegó los merecidos beneficios del descubrimiento de la reacción en cadena de la polimerasa, pero la técnica ha revolucionado las pruebas diagnósticas y la investigación básica. Desde la aprobación de la insulina humana recombinante en 1982, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) ha aprobado 15 productos biofarmacéuticos más y hay otros 120 en espera de examen.

Entre las bajadas de unos y los ascensos de otros, hubo también éxitos sobresalientes en los pioneros del sector. Pensemos, por ejemplo, en Amgen que, con un activo de 7,7 millones de dólares, supera la veterana Schering-Plough, y lucha por hacerse un hueco entre las empresas con mayores beneficios, gracias, en particular, a la eritropoyetina (EPO), una proteína estimulante de los glóbulos rojos de la sangre, y a Neupogen, un factor estimulante de colonias de granulocitos.

Amgen se propuso desarrollar la EPO cuando otras compañías se concentraban en la ingeniería genética de hormonas cuya eficiacia para el tratamiento de enfermedades era ya conocida, verbigracia, la hormona del crecimiento. La EPO ha reportado a Amgen más de 660 millones de dólares desde su aprobación en 1989 para la terapia de la anemia causada por diálisis renal. De no recurrir a ella, sólo podemos aliviar la dolencia mediante transfusión de sangre. "Hemos de atravernos a salir de la rutina", subraya George B. Rathmann, presidente emérito de Amgen. "Ser el primero compensa."

Rathmann siguió su propio consejo "salir e innovar" en septiembre de 1989, cuando participó en la gestación de ICOS. Repitiendo la estrategia clave de Amgen —conseguir mucho dinero pronto— la firma reunió 33 millones de dólares, invertidos por personalidades notables, un año antes de empezar a rodar. La oferta pública en junio de 1991 aportó otros 36 millones. La salud financiera y un conjunto de genes humanos implicados en la transmisión de mensajes celulares reforzaron la posición de la empresa en su trato con socios potenciales. Glaxo se ha unido a ICOS para fabricar antiinflamatorios contra la artritis, el asma y la esclerosis múltiple.

ICOS sirve de muestra que nos revela hacia dónde va el sector de la biotecnología, sobre todo, las empresas jóvenes. Y esa dirección no es otra que el desarrollo de fármacos para indicaciones que se ignoraban o no daban resultado con los métodos tradicionales. El año pasado, las ofertas públicas iniciales de unas 35 compañías, que los analistas llaman "la promoción del 91", lograron más de mil millones de dólares de los inversores.

Nuevos objetivos para compañías jóvenes

Tecnología antisentido

Los oligonucleótidos antisentido, que funcionan como un "velcro" molecular que se pega al ADN o al ARN mensajero, bloquean los oncogenes y genes determinantes de enfermedades infecciosas, inflamatorias y cardiovasculares. De momento se ha puesto la mirada en los virus, el herpes entre ellos.

Trabajan en esa línea: Isis, Gilead Sciences, Genetic Medicine, Triplex

Trastornos autoinmunes

En vez de desarmar por entero el sistema inmune, se investigan vías plausibles de inactivar subgrupos de células o bloques que reaccionan contra su propio organismo y desencadenan, entre otras, la artritis reumatoide, esclerosis múltiple, SIDA y alergias.

Trabajan: Anergen, IDEC, ImmuLogic, Vertex

Moléculas de adhesión celular

Al clavarse en determinadas zonas de la superficie celular, ciertas moléculas desencadenan un vasto repertorio de procesos biológicos; el más común, la inflamación. Los fármacos que bloquean esas llaves servirán para tratar la artritis reumatoide, las enfermedades cardiovasculares, la psoriasis y la sepsis.

Trabajan: Icos, COR, Cytel, Glycomed

Trastornos del sistema nervioso central

Algunas compañías se están especializando en la fabricación de compuestos neuroprotectores y factores de crecimiento, preparados de suerte tal que atraviesen la barrera hematoencefálica. Podrían servir para tratar heridas de la cabeza y médula espinal, además de apoplejía, enfermedad de Alzheimer y otros trastornos degenerativos.

Trabajan: Alkermes, Cambridge NeuroScience, Cephalon, Regeneron

Terapia ex-vivo

Las células de la sangre o médula del paciente, una vez extraídas, se clasifican debidamente para su posterior modificacion o estimulación genética. Luego, se procede a su cultivo y se reintroducen en el organismo, como se explica en el artículo de David W. Golde, de este número. Se confía en esa técnica para la terapia del cáncer, deficiencias enzimáticas y trastornos hereditarios.

Trabajan: Applied Immune Sciences, CellPro, Genetic Therapy

Fue el mejor año para la financiación de biotecnología, que acabó con la sequía inversora de las postrimerías de los ochenta.

Las nuevas empresas, además, vienen mejor capitalizadas que sus antecesoras. Y se proponen desarrollar tratamientos altamente específicos contra la alergia, trastornos neurodegenerativos, cáncer, virus y enfermedades cardiovasculares y autoinmunes. No se limitan ya al campo experimentado de las proteínas; bucean en los péptidos, hidratos de carbono, lípidos, enzimas e incluso fármacos de síntesis tradicional, abordados ahora con las técnicas de la biología molecular. Algunas empresas quieren cortarle el paso a ciertas afecciones bloqueando la expresión génica con ADN antisentido.

Las empresas más jóvenes no caen ya en la ingenuidad de los primeros tiempos y seleccionan con mayor acierto su producto potencial. Se estudian con pormenor los costes de producción y fabricación en gran escala, medios potenciales de administrar industrial, el alcance de las patentes en el proceso de síntesis y el carácter óptimo, no meramente bueno, de la actividad terapéutica del producto.

La necesidad de mantener la línea de la empresa significa que muchos proyectos acabarán en la papelera... hasta que un científico frustrado decida seguir adelante y desarrollar la idea en otra parte. Es ley de cualquier empresa sana, y podríamos numerar múltiples ejemplos corroboradores. Se está asentando, también, un nuevo estilo de gestión. Los directivos se mueven en la treintena y llevan a sus espaldas años de experiencia en la banca o en servicios financieros. A diferencia de los científicos fundadores de muchas de las empresas pioneras, que carecían por completo de experiencia comercial, los nuevos empresarios no están dispuestos a seguir con los usos tradicionales. Propósitos que han puesto a los analistas en estado de alerta. No deben fiarse sólo de su experiencia personal. La FDA no es la Comisión de Bolsa.

Las condiciones que debe cumplir un fármaco para merecer la aprobación por parte de la FDA se están flexibilizando. La puntillosa severidad en la garantía y eficacia del producto deja paso a algo más nebuloso, la farmacoeconomía. La vía de administración y expedición de los fármacos, el pago de los mismos y la calidad de vida que proporcionan comienzan a abrirse paso en la decisión que toma el organismo. Este verá con buenos ojos las empresas que puedan demostrar que su medicamento ahorra dinero, reduce el internamiento hospitalario y promueve una vida productiva.

El conflicto, real o potencial, de las patentes continuará siendo una piedra en el zapato de las empresas. Las viejas disputas sobre si una proteína alterada en un solo aminoácido es o no un producto diferente, se irán diluyendo conforme se vayan creando moléculas menores y más específicas. Pero los derechos en conflicto que prometen las patentes expedidas en otros países sí provocarán batallas internacionales de altísimo coste. En el otro lado de la balanza está la pérdida de valor del secreto industrial. En un mundo donde la información viaja a la velocidad de la luz y llega a los competidores en segundos, los secretos industriales pueden convertirse en excusa y lastre. No suelen hacer maravillas los meros copiones.

Técnica de consumo

El porvenir de una pila fotovoltaica especial

Las pilas fotovoltaicas las encontramos lo mismo en las pequeñas calculadoras que en versiones de mayor potencia para el suministro eléctrico a zonas alejadas de la red nacional. Comienzan a proliferar luces en aparcamientos y señales de tráfico alimentadas por pilas solares. Pero los sistemas que se emplean, basados en el silicio en su inmensa mayoría, resultan bastante caros todavía. Se barajan cifras en torno a las 1000 pesetas por watt.

De aquí el interés que ha despertado una nueva técnica de fabricación de pilas fotovoltaicas, que se apoya en el dióxido de titanio coloreado y donde la química imita el papel de la clorofila en la fotosíntesis. Las pilas construidas prometen un rendimiento superior a menor coste. Esta persuasiva combinación podría dar un fuerte impulso a la energía fotovoltaica. Hay ya en fase de instalación en todo el mundo unos 50 megawatts de capacidad fotovoltaica, valorados en 70.000 millones de pesetas.

La pila, producto de casi una década de trabajo de Michael Grätzel, del Instituto Politécnico Federal de Lausanne, es objeto de investigación por parte de dos de las principales compañías europeas. Grätzel describía recientemente un modelo que lograba un rendimiento del 7 por ciento para luz solar directa y un 12 por ciento con luz solar difusa. Valores parangonables con los obtenidos por las mejores pilas de silicio amorfo, aunque otras pilas más complejas, que usan arseniuro de galio, han logrado hasta un 30 por ciento de eficacia. Pero hay campo para refinar la pila de Grätzel.

Sin olvidar que el ingenio comercializado sería de más fácil elaboración y más barato que el construido para las pilas de silicio. El aparato de Grätzel es una pila electroquímica: dos electrodos en contacto con un líquido que contiene iones portadores de carga. Uno de los electrodos está recubierto por una capa de partículas de dióxido de titanio, protegidas a su vez con una tinción especial. El colorante, basado en el rutenio, ofrece una semejanza sorprendente con la clorofila, pues ambas moléculas constan de un átomo metálico rodeado de anillos de carbono y nitrógeno capaces de captar la energía solar.

Las moléculas fotosensibles del colorante absorben fotones de la luz in-

Un nuevo camino hacia las pilas fotovoltaicas

LUZ VISIBLE
ELECTRODO (VIDRIO TRANSPARENTE CONDUCTOR)
ELECTRONES
CAPA DE OXIDO DE TITANIO RECUBIERTA DE TINTE
ELECTROLITO
CONTRAELECTRODO (VIDRIO CONDUCTOR PLATINADO)
CARGA

Las partículas de dióxido de titanio tintadas captan la energía de la luz solar. Los electrones del tinte de rutenio circulan, a través de una capa de vidrio conductor, en torno al circuito externo hasta un contraelectrodo. Los iones yodo en el electrolito transportan los electrones de nuevo al tinte, cerrando el circuito.

cidente, convertidas en antenas en miniatura, y ceden electrones al dióxido de titanio rodeado. Los electrones circulan desde el electrodo absorbente de luz, a lo largo de un circuito externo, hasta un contraelectrodo, y son devueltos al tinte por los iones yodo en el electrolito.

A lo largo de los años ochenta se intentó proteger, mediante colorantes, los semiconductores para mejorar su absorción de la luz, pero siempre se tropezaba con el mismo problema: la capa de tinte cuyo grosor resultaba adecuada por constituirse en absorbente de luz pecaba de excesiva para un transporte eficaz de los electrones al semiconductor subyacente. Además, los colorantes orgánicos perdían la estabilidad con el tiempo.

Grätzel hizo un descubrimiento clave en 1985: modificó cierto colorante fundado en el rutenio para que incluyese grupos químicos que lo enlazasen fuertemente al dióxido de titanio. La capacidad de transportar corriente se multiplicó por 10.000. El último avance supone ya su viabilidad comercial. Brian O'Regan, colaborador suyo, preparó la técnica conveniente para depositar finas partículas de dióxido de titanio de una solución coloidal sobre un substrato de vidrio conductor. La capa de la pila Grätzel–O'Regan tiene ahora un área de 780 unidades por cada unidad de vidrio cubierto. Este aumento de área posibilita que el colorante absorba la mayor parte de los fotones incidentes y ceda al mismo tiempo electrones al vidrio.

Se esperan ulteriores progresos. Desde 1989, Sandoz subvenciona el trabajo de Grätzel en la síntesis y ensayo de nuevos colorantes, mientras él va también sumando patentes de productos que absorben la luz con eficacia creciente. Y ello sin ladear una condición deseable: la estabilidad de los mismos durante 10 o 20 años.

Automovilismo en verde

Reciclaje de los componentes de los coches

Gerhard Rohlfs no ha montado un coche en su vida. Ni ninguno de la veintena de obreros que componen la plantilla de una factoría insólita de Volkswagen, situada en Leer, Alemania. Pero han desguazado, destrozado y pulverizado cuantos VW han caído en sus manos, que no han sido pocos.

El laboratorio de Leer constituye la punta de lanza de un movimiento de respuesta ante el problema ambiental que gravita sobre el sector del automóvil: el reciclaje. Esa planta piloto ha centrado la atención de legisladores e ingenieros de diferentes partes del mundo. Se explica esa primacía germana, en parte, por la presión ecologista allí existente. Los alemanes desguazaron unos dos millones de coches en 1990. Aun cuando alrededor del 75 por ciento de ese material se está ya volviendo a usar, bien como chatarra o como repuestos reacondicionados de segunda mano, la restante amalgama de plásticos, goma, vidrio y otros diversos materiales importa más de 400.000 toneladas anuales de desechos. Un problema de carísima solución, si recordamos, además, que Alemania conjuga una normativa muy restrictiva sobre la quema de residuos con la escasez agobiante de vertederos.



LOS COCHES PARA CHATARRA alcanzan en Alemania más de dos millones cada año. Los fabricantes de automóviles esperan ahora poder reciclarlos. Foto: Volkswagen.

La planta de Leer es, en realidad, una empresa participada por Volkswagen, la cámara de comercio de Frisia oriental, la oficina de empleo de Leer y un chatarrero local. Esa pluralidad de accionistas revela hasta qué punto deben implicarse distintos sectores si queremos salvar de la quema ese 25 por ciento del desguace que se convierte en basura. Y ello ganando dinero. Por eso el grupo de VW en la planta de Leer están interesada en un desguace rápido para extraer los componentes que se enviarán a otros lugares, donde se reprocesarían y reciclarían. Todavía cuesta dos horas-hombre desmontar un modelo sencillo.

Se empieza por drenar todos los fluidos: aceite del motor y la transmisión, líquidos de refrigeración y de frenos, etcétera, que se almacenan en barriles para su aprovechamiento ulterior. Se desmontan los grandes bloques: motor, batería, caja de cambios y neumáticos, que se transforman en repuestos de segunda mano o se venden según sus materiales componentes. Por último, se arrancan las piezas grandes de plástico: parachoques, depósito de gasolina y decoración interior.

Volkswagen está orgullosa de sus parachoques. Una vez despojados de las tiras de metal y embellecedores, los parachoques de plástico se muelen en forma de bolitas que se mezclan con resina nueva para fabricar nuevos parachoques. Se trata de convertir los parachoques viejos en otros nuevos, no en macetas. Desde mayo, alrededor del 20 por ciento del material de los nuevos parachoques destinados al modelo Polo procede de parachoques reciclados.

No podemos, sin embargo, generalizar la suerte de los recicladores. Los parachoques no se fabrican todos igual. Las mezclas que usa VW difieren de las empleadas por Audi. Y las divergencias no acaban ahí. VW, por su cuenta, estudia la reducción de la cifra de componentes: el depósito de gasolina del VW Golf, que entró en producción el pasado verano, tiene once componentes menos que el prototipo anterior.

Aun así, los plásticos siguen atormentando al reciclador. Los esfuerzos de Volkswagen se refieren solamente al 30 o 40 por ciento de los 100 kilos de termoplásticos que hay en sus coches. Pero no perdamos de vista otros componentes de reciclaje harto difícil. En Leer no se ha encontrado todavía ninguna aplicación para los vidrios; los salpicaderos y los volantes son también combinaciones tan complicadas de materiales que separar los componentes sería extremadamente caro.

Aun con todo, más difícil que separar los materiales será resolver el problema de quién, llegado el momento, debe emprender los proyectos de reciclado, cuántas marcas y modelos diferentes de coches tendrá que manejar y quién cargará con los costes.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Breve marcha hasta el infinito

Diario del capitán, fecha estelar 2529.2: "La misión quinquenal del *navío estelar Superambicioso* consiste en invadir mundos nuevos y extraños, provocar catástrofes en nuevas civilizaciones y encaminarse temerariamente allá donde *Flota estelar* nos ordene. Pero lo que más nos suele ocurrir es toparnos con zombies moradores del espacio que se tienen por capaces de pulverizar a un *navío espacial*. Ayer, sin ir más lejos, una oruga cósmica nos encapsuló en una gigantesca crisálida. El bichejo no fue enemigo para nuestro destejedor de materia-antimateria: desbobinamos la crisálida y ahora tenemos seda suficiente para toda la tripulación. Hemos puesto rumbo a ..."

¡Alerta roja! ¡Alerta roja! ¡Uuuup! ¡Uuuup!

Con el susto, el Capitán Jonah T. Kink estuvo a punto de caerse de su sillón en el puesto de mando.

"Por el amor de Dios, ¿qué pasa ahora, Sr. Pock?"

El Primer Oficial Pock corrió a su consola. "Capitán, al parecer nos hemos tropezado con una región extraña y deslumbrante del espacio", dijo, al tiempo que alzaba una ceja y meneaba sus orejas hirsutas. "Tengo una certeza del 99,357 por ciento de que hemos penetrado en un Campo Newtoniano Ideal."

"¡Por las llamas del infierno! ¿Qué es un Campo Newtoniano Ideal?", exclamó el Dr. Latazo desde el otro lado de la sala de derrota.

"Tenga tranquilidad, Latazo, o le envío otra vez a suturar la oruga cósmica!", ladró más que dijo Kink. "Prosiga, Sr. Pock."

Pock había nacido y se había criado en el planeta Vulgo. Su madre era vulgar y su padre un jabalí velludo. Así que Pock era medio-vulgar; bastante más, según almas bienintencionadas. "Mi capitán, la alerta roja se disparó justo al aproximarnos a un planeta habitado por unos alienígenas extraordinarmente inteligentes conocidos por weelers. Su tecnología es tan avanzada que pueden crear universos enteros, muy diferentes de los nuestros. Al parecer, los weelers nos han capturado en un universo gobernado por las leyes de la física newtoniana. El *Superambicioso* se encuentra ahora navegando a través de un universo tridimensional infinito, en el que tanto el espacio como el tiempo son absolutos."

"Lo que usted quiere decir es que no hay relatividad. Einstein quedaría horrorizado."

"Una deducción lógica, mi capitán. Pero las consecuencias son mucho más alarmantes. En un Campo Newtoniano Ideal un cuerpo material puede no ser más que un punto en el espacio y... Disculpe, señor. Los sensores indican que un proyectil viene en nuestra dirección."

"Póngalo en la pantalla, Sr. Pock. Maniobras evasivas, Sr. Flakeoff."

El proyectil iba aumentando su velocidad más y más.

¡Uoooooshh!

Kink y su tripulación sufrieron una sacudida, como los viajeros en el metro. 'Teniente Yahuta, ¿ha podido usted determinar la trayectoria del proyectil?"

"El proyectil llevaba rumbo 12 coma 53 coma 30, pero de repente ha abandonado el universo."

"¿He de entender que se ha volatilizado?"

"No del todo, mi capitán. Ha alcanzado el infinito. Llegó allí exactamente 17,23 segundos después de ser detectado por nosotros."

"Me deja de una pieza", declaró Pock. "Un fenómeno totalmente desconocido para humanos o vulgares."

"El proyectil constaba de cierto número de masas puntuales", precisó Yahuta.

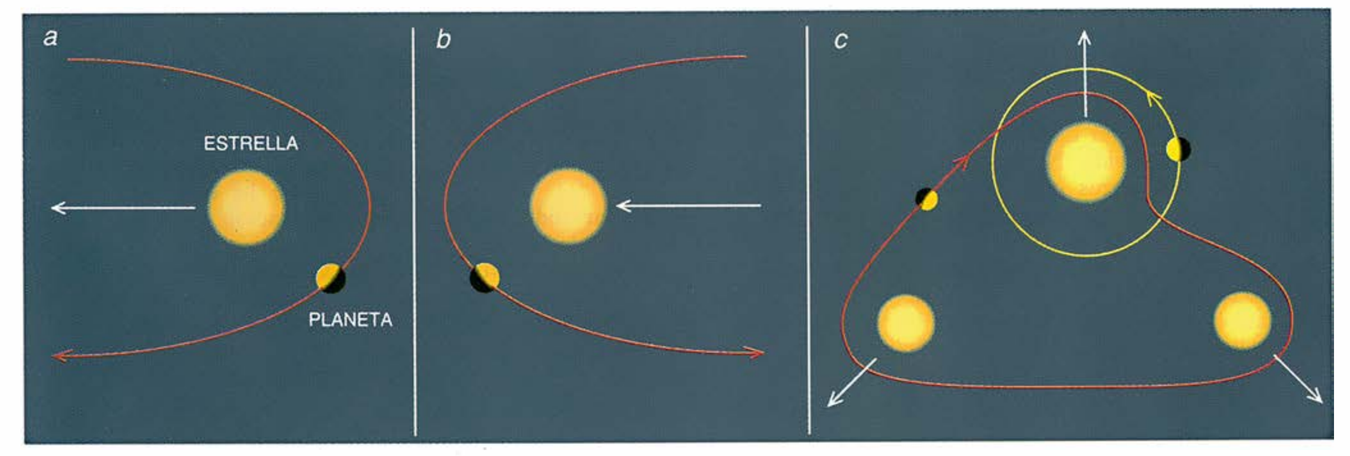
"Sr. Dott, ¿qué resultados da su análisis?" El ingeniero jefe, un escocés, estudió sus intrumentos. "Puntos materiales newtonianos, me arriesgaría a decir, capitán. Partículas muy pequeñas. Newtrones o newtrinos, no estoy seguro de cuáles."

"¿Hay trazas de fuerzas insólitas?"

"No, mi capitán. Tan sólo la ley habitual del inverso del cuadrado."

El Sr. Pock pulsó unas cuantas teclas en su computadora. "Mi capitán, el proyectil ha volado hasta el infinito en un intervalo finito de tiempo, sin auxilio de ninguna tecnología, excepto el Campo Newtoniano Ideal."

"Pero... ¡Eso es imposible!", exclamó Kink. "Un sistema de masas gravitatorias puntuales no puede salir sin más disparada hacia el infinito. Se infringiría la ley de conservación de la energía."



1. EL EFECTO DE HONDA provoca la aceleración del planeta cuando éste se aproxima a la estrella en dirección contraria a la del movimiento de la misma (*a*). Si el planeta viaja en el mismo sentido que la estrella (*b*), su movimiento decelera, mientras la estrella acelera. A causa del efecto de honda, los cuerpos celestes de la configuración de la derecha (*c*) acelerarán en diversas direcciones.

“Eso es incierto, mi capitán”, explicó Pock. “Las ganancias en energía cinética podrían quedar compensadas por pérdidas de energía potencial. Las masas pueden aumentar de velocidad a condición de que lo hagan en un campo gravitatorio cada vez más y más débil. Tal situación puede darse si las masas continúan alejándose más y más unas de otras. Yahuta, dígame, ¿partieron todas las masas hacia el infinito en la misma dirección?”

“No, Sr. Pock. En esencia, las masas hicieron explosión en todas las direcciones”, dijo la teniente.

Kink insistió. “Bueno, en cualquier caso las masas siguen sin poder llegar al infinito. Tal cosa va contra la lógica.”

Las orejas de Pock quedaron enhiestas al sonido de una de sus palabras favoritas. “Lógicamente, mi capitán, eso es correcto. Pero en cierto sentido se podría demostrar que una partícula habrá de llegar al infinito si logramos deducir que la partícula tendrá que atravesar una esfera de tamaño prefijado cualquiera tras un lapso de tiempo adecuado.”

El rostro de Kink acusaba perplejidad.

“Capitán”, prosiguió Pock, “pensemos en una única partícula que viajase en línea recta a velocidad constante. Tal partícula, transcurrido un tiempo infinito, habría escapado del interior de cualquier esfera finita, y caería realmente por el borde de un universo. Lo que pasa”, se apresuró a añadir, “es que uno no se puede caer del borde de un universo infinito.”

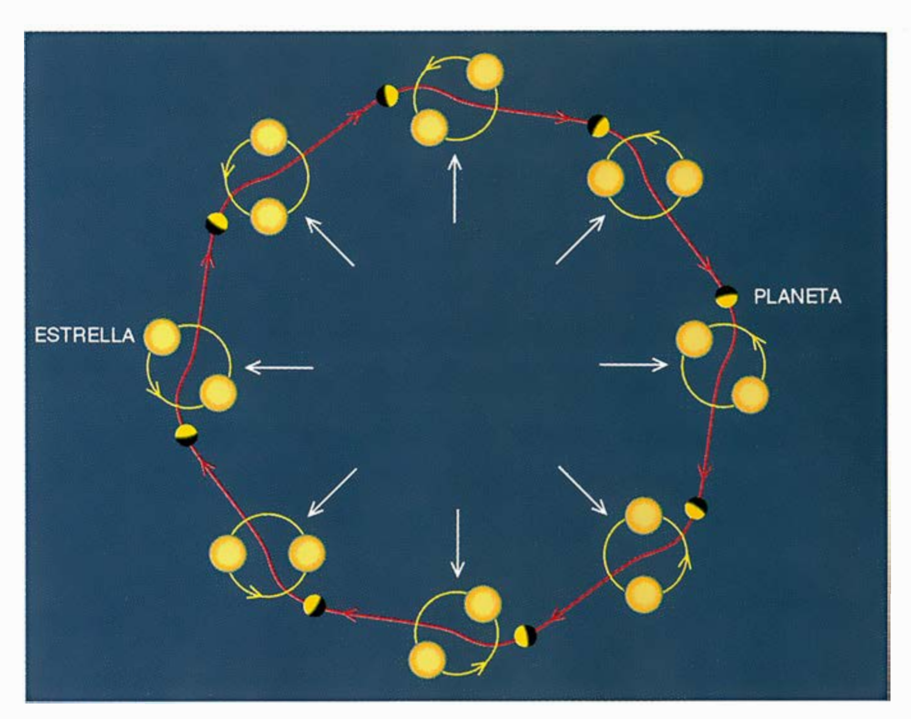
“Naturalmente, Sr. Pock, lo que quería decir es que las masas no pueden escapar hasta el infinito en ningún período finito de tiempo.”

Pock sacudió las orejas y se concentró profundamente. “Es probable que tenga usted razón, mi capitán. Empero, se me ocurre un mecanismo al caso.”

El Sr. Dott terció ruidosamente. “Tenga la amabilidad de iluminarnos, Sr. Pock.”

“Si una partícula acelerase con suficiente rapidez podría recorrer una distancia infinita en un tiempo finito. Imaginemos que durante el primer segundo la partícula se mueva a la velocidad de un metro por segundo. En el primer segundo recorre un metro. Acelerémosla ahora, de forma que durante el medio segundo siguiente viaje a dos metros por segundo, con lo que en ese tiempo recorrerá otro metro más. Prosigamos después del mismo modo, reduciendo a la mitad el intervalo de tiempo y duplicando en él la velocidad, de la forma siguiente.” Con su estilógrafo de ordenanza, Pock formó una tabla.

“Al cabo de dos segundos, la partícula habrá recorrido una distancia infinita, con tal de que la velocidad aumente a una tasa mayor que aquella con la que decrecen los intervalos de tiempo. Dicho de otro modo, cualquier partícula llegará al infinito si su velocidad aumenta en progresión geométrica en intervalos que decrecen en progresión geométrica. Llamaré a esta ley ‘Principio de crecimiento geométrico de Pock’. El tiempo requerido para llegar al infinito dependerá de las tasas de crecimiento, pero siempre será finito.”



2. UN NUMERO CUALQUIERA de planetas y estrellas puede escapar hacia el infinito si sus órbitas trazan figuras como la que vemos. La disposición se basa en un polígono regular, un octógono en este caso. En cada lado del polígono hay dos estrellas y un planeta. Los pares de estrellas orbitan en torno a cada vértice del polígono. Los planetas viajan de uno a otro par binario.

	Velocidad (metros/ segundo)	Distancia (metros)	Distancia total
Primer segundo	1	1	1
1/2 de seg. siguiente	2	1	2
1/4 de seg. siguiente	4	1	3
1/8 de seg. siguiente	8	1	4
1/16 de seg. siguiente	16	1	5
1/32 de seg. siguiente	32	1	6

“Pero, Sr. Pock”, protestó Dott, “eso significa que el diablillo en cuestión tiene que viajar más rápidamente que la luz.”

“Desde luego”, dijo Pock. “Pero no necesito recordarle que en un Campo Newtoniano Ideal los objetos pueden alcanzar cualquier velocidad.”

Kink tamborileó con los dedos en los brazos del sillón. “Dotty, ¿podemos defender la nave de masas puntuales newtonianas?”

“Las bombas de newtrones deberían conseguirlo, mi capitán, pero nuestra dotación de ellas es muy reducida. Aunque... ayúdeme en una cosa, Yahuta. ¿Cuántos de esos monstruos puntuales nos han rebasado?”

“No estoy segura, señor. No muchos. Los acontecimientos fueron tan rápidos que los instrumentos no lograron obtener un recuento preciso.”

“No pudo haber sido un solo cuerpo”, musitó el vulgar. “Un solo cuerpo, sometido a la gravitación newtoniana y no influido por otras fuerzas, se mueve en línea recta y a velocidad constante.”

“En tal caso, tal vez hubiera dos cuerpos”, afirmó Kink.

“No, mi capitán”, dijo Pock. “En el caso de dos partículas las órbitas hubieran sido elipses, hipérbolas o parábolas. Los planetas describen trayectorias elípticas; los cometas venidos de lo profundo del espacio se mueven en órbitas hiperbólicas o parabólicas. Los planetas apresados en órbitas elípticas no pueden de ninguna manera alcanzar el infinito; permanecen ligados a sus soles. Los cometas pueden alcanzar el infinito, pero para ello necesitan también un tiempo infinito, porque los cometas van perdiendo velocidad conforme se alejan.”

“Entonces, ¿cuántos de esos condenados cuerpos hay?”

“Capitán, puede tener la certeza de que los weelers utilizarían el mínimo número posible de masas. Su superlativa eficiencia es legendaria. Solicitaré información al ordenador de la nave.” Pock hizo girar algunos mandos. “In-

teresante. Al parecer, el problema fue planteado por vez primera en fecha estelar 1895 por el matemático Paul Painlevé..."

"Pock, no hace falta que nos lo lea. Conecte el sintetizador de voz del ordenador."

Del ordenador salía una voz que parecía la del Pato Donald hablando a través de una lata. "Painlevé estudiaba singularidades, o sea, situaciones en las que pueden ser infringidas las leyes de la física newtoniana. Más concretamente, un sistema puede tener una singularidad en un instante dado si no es posible prolongar más allá de ese instante las soluciones de sus ecuaciones dinámicas. La singularidad más sencilla que se puede dar en un sistema de masas gravitatorias puntuales es que ambas masas hagan colisión y ocupen un mismo punto del espacio. Además de las colisiones, se dan también singularidades cuando una masa alcanza el infinito en un periodo de tiempo finito. Tales situaciones se denominan hipersingularidades."

"Como ya he explicado, con sólo uno o dos cuerpos es imposible que se produzcan hipersingularidades", añadió Pock.

"¡Ay, señor Pock! ¡Es usted tan inteligente que le daría un beso, si pudiera!", exclamó la computadora. El vulgar se puso colorado.

"¡Computadora!", rugió Kink."¡Deje de coquetear con el Sr. Pock y vuelva al trabajo!"

"Painlevé demostró que tres cuerpos no pueden generar una hipersingularidad, pero no pudo generalizar su trabajo a cuatro o más cuerpos. Painlevé distinguió dos variedades de hipersingularidades. Uno de los tipos se da cuando un cuerpo se aleja volando hasta el infinito a lo largo de una trayectoria sencilla. En la otra categoría se tiene un cuerpo que empieza a oscilar cada vez más violentamente cuando el tiempo tiende hacia un determinado valor. En el siglo XX, Hugo von Zeipel, de la Universidad de Upsala, Richard P. McGehee, de la Universidad de Minnesota, Donald G. Saari, de la Universidad Northwestern, y Hans Sperling, que a la sazón trabajaba para Boeing Aircraft, demostraron que cualquier sistema que engendre uno de los tipos de hipersingularidad también ha de producir forzosamente el otro. Dicho de otro modo, ciertos cuerpos tienen que viajar hasta el infinito y oscilar con violencia."

"Cuéntame más acerca de esos cuerpos hiperzumbantes e hiperbamboleantes", exigió Kink.

"Saari demostró que puede darse una hipersingularidad con cuatro cuerpos. Pero si las posiciones, velocidades y masas de esos cuerpos se toman al azar, la probabilidad de hipersingularidad es prácticamente nula. John N. Mather, de la Universidad de Princeton, y MacGehee sí descubrieron una hipersingularidad en un sistema de cuatro cuerpos confinados a una recta, pero sólo tras un infinito de colisiones, hipotéticamente seguidas de rebotes elásticos. Después, en fecha estelar 1984, Joseph L. Gerver, de la Universidad de Rutgers, se presentó con un supuesto que consiente que cinco cuerpos escapen hasta el infinito. Permítame mostrar lo que Gerver descubrió."

La computadora comenzó a proyectar imágenes sobre la pantalla principal. Mostró tres estrellas, una de ellas mayor que las otras dos. Dibujaban un triángulo, con ángulo obtuso en la estrella más pesada. "Recuérdese, la masa de estas estrellas está confinada en un punto. Su tamaño en la pantalla representa sólo su masa relativa."

Apareció un asteroide en una órbita que rodeaba por el exterior a las tres estrellas, acercándoseles mucho. Cada vez que el asteroide pasaba junto a la más masiva de las tres, su velocidad se incrementaba en virtud del "efecto de honda". El asteroide ganaba energía gravitatoria de la estrella, mientras que la energía de la estrella decrecía en la misma cantidad. En los encuentros subsiguientes con las otras estrellas, el asteroide les transfería energía por efecto de honda inverso. En consecuencia, las velocidades del asteroide y de las dos estrellas menores resultaban incrementadas.

"En este sistema, la ley de conservación de la energía impide que también la estrella grande incremente su velocidad. En consecuencia, ninguno de los objetos puede escapar al infinito en un periodo de tiempo finito. Pero Gerver encontró una argucia legal."

El ordenador exhibió un quinto cuerpo, un planeta que orbitaba en torno a la estrella de masa mayor. Ahora, cada vez que el asteroide pasaba como un látigo junto al planeta y la estrella, el planeta perdía energía; tanto así, que la estrella de gran masa comenzó a adquirir alguna. En cada circunvalación del asteroide, las estrellas y el asteroide aceleraban su velocidad, mientras el planeta, al perderla, se veía obligado a trazar una espiral descendente hacia la estrella. Las energías se equilibraron y el triángulo comenzó a crecer con la rapidez de una progresión geométrica. En un periodo finito de tiempo, las estrellas habían escapado al infinito, ¡llevándose consigo al asteroide y al planeta!

La computadora prosiguió: "Gerver observó que, si bien se trata de un supuesto plausible, los cálculos precisos para demostrar su operación se lían tanto que no es posible llevar la demostración a término. Entonces, en fecha estelar 1989, Gerver sacó partido de una idea propuesta por Scott W. Brown, hoy en la Universidad de Indiana, y consiguió demostrar que un número n de cuerpos puede huir al infinito si n adquiere el valor necesario. La configuracion utilizada consiste en una versión más simétrica del triángulo de estrellas y consta de un número cualquiera de pares de estrellas binarias, todas ellas de la misma masa."

El ordenador presentó ocho pares de estrellas, cada uno de los cuales trazaba una órbita circular en torno a su centro de masas. Los centros ocupaban los vértices de un octógono regular. El mismo número de planetas se movían siguiendo aproximadamente los lados del octógono. Todos los planetas poseían la misma masa, pero ésta era mucho menor que la masa de las estrellas. Cada vez que un planeta se aproximaba a una estrella binaria, el planeta adquiría energía cinética por efecto honda. La estrella binaria compensaba tal ganancia perdiendo energía cinética propia y bajando a una órbita más estrecha. El planeta transfería también impulso mecánico a la estrella binaria, provocando que ésta se moviera hacia afuera, alejándose del centro del polígono. Por la simetría, la totalidad de los ocho pares de estrellas se veían afectados exactamente de la misma manera y exactamente al mismo tiempo.

El ordenador comenzó a mostrar en animación los cuerpos celestes. En cada etapa crecía el polígono; los planetas se movían más rápidamente y las estrellas binarias cerraban más y más sus órbitas, aproximándose una a la otra.

El Sr. Pock se apoderó de los controles del ordenador como si fuera un vulgar niño. "¡Qué guay! ¡Déjame probar a mí!" Se puso a botar en su asiento, hasta que sus ojos captaron la pétrea mirada del capitán. Controló su entusiasmo, aunque no sin esfuerzo.

"Capitán, el sistema completo parece huir al infinito tras un número infinito de golpes de honda, que tienen lugar cada vez más rápidamente durante un tiempo finito", dijo Pock. "Sin embargo, una simulación por ordenador no es una demostración lógica. Es necesario demostrar que en condiciones iniciales adecuadas se producirá necesariamente la secuencia correcta de acontecimientos." Permaneció un momento en reflexión. "La simetría habría de desempeñar un papel en la demostración, pues permite simplificar el problema de $3n$ cuerpos a sólo 3. Una vez que hayamos determinado las posiciones y velocidades de un sistema binario y de un planeta, la simetría se encarga de determinar las de los cuerpos restantes. Dicho de otro modo, el problema se reduce a otro sobre tres 'cuerpos' desconectados, compuesto cada uno por un polígono regular de masas puntuales, que se mueven por

acción de un sistema de fuerzas muy complicado. Aun con esta simplificación, sigue pareciéndome un problema intratable", dijo Pock.

"Si el número *n* es suficientemente grande se puede dar una demostración capaz de satisfacer a una lógica de las que parten un pelo en cuatro, porque en ese caso las fuerzas se simplifican", comentó la computadora.

"¡Galaxias ardientes! ¡Lo único que me interesa es saber cuán grande ha de ser *n*!", exigió Kink.

"Gerver no determinó el valor exacto", respondió Pock.

"¡Maldita sea!", aulló el capitán del crucero de *Flota estelar*. "¿Es que nadie puede darme una respuesta simple?"

"En fecha estelar 1988 Zhihong (Jeff) Xia, que estaba por entonces en Northwestern, demostró la existencia de un modo de hacer que cinco cuerpos escapen al infinito en un tiempo finito. Su planteamiento difiere del expuesto por Gerver, pero también recurre a la simetría."

"¡Por fin!", suspiró Kink. "Así pues, con cinco masas basta."

"Y es prácticamente seguro que cuatro no", añadió Pock. "Dado que los weelers utilizan siempre los medios óptimos para lograr sus fines, el proyectil debió consistir de cinco cuerpos exactamente."

"Bueno es. Tenemos con seguridad cinco bombas newtrónicas guardadas por ahí. Lo único que ahora necesito saber es qué intenciones tienen. ¿Para qué nos habrán capturado en un Campo Newtoniano Ideal?"

"¡Capitán!" Yahuta echó una mirada preocupada por encima del hombro, mientras sus dedos seguían tocando un rap en el teclado. "El *Superambicioso* está siendo atraído por el campo gravitatorio de un sistema complejo de estrellas cercanas. Tenemos velocidad de torsión 1 y creciendo. ¡Capitán! ¡Está creciendo en progresión geométrica en intervalos de tiempo geométricamente decrecientes! ¡Torsión 2! ¡Torsión 4!...8!...16!"

Kink se volvió hacia su timonel. "Sr. Flakeoff. Dispare las bombas newtrónicas antes de que todos desaparezcamos en el infi..."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A POSSIBLE MODEL FOR A SINGULARITY WITHOUT COLLISIONS IN THE FIVE BODY PROBLEM. Joseph L. Gerver en *Journal of Differential Equations*, vol. 52, n.º 1, págs. 76-90; 30 de marzo de 1984.

THE PROBLEMS OF MATHEMATICS. Ian Stewart. Oxford University Press, 1987.

THE EXISTENCE OF PSEUDOCOLLISIONS IN THE PLANE. Preimpresión. Joseph L. Gerver. Rutgers University, 1990.

Libros

A. Domínguez Ortiz, J. Agustí, L. Alonso, F. Nicolau, A. Romo y A. Malet

Historia de España

Los judíos

De historia judia hispanica, por David Romano. Publicaciones de la Universidad de Barcelona; Barcelona, 1991.

David Romano es un sefardí nacido en Estambul que ha desarrollado en España una intensa actividad publicística y docente. Aunque la cátedra que ha ocupado en la Universidad de Barcelona es la de Lengua y Literatura italiana y ha escrito, dentro de esta especialidad, numerosos trabajos, su principal dedicación ha sido la historia de los judíos en la España medieval, sobre todo en los reinos de la Corona de Aragón. Como a tantos otros, le ha sorprendido la jubilación en plena madurez, en plena actividad científica y magistral, en "virtud" de una desdichada ley cuyos males todos reconocen aunque hasta ahora no se le ha encontrado más paliativo que otorgar la cualidad de *emérito* a las víctimas de la misma. Con tal motivo, un grupo de amigos y discípulos ha patrocinado la publicación de este libro, en el que se recogen muchos de sus trabajos dispersos: conferencias, artículos de revista, etc. Antecede una breve presentación y cierra el volumen la bibliografía completa del profesor Romano.

Puesto que no sería posible ni útil reseñar una por una las numerosas aportaciones aquí reunidas, me limitaré a una breve síntesis de aquellas que, por ser de alcance general, pueden interesar más al lector no especializado. *Los judíos en la Corona de Aragón en la primera mitad del siglo XV* es una síntesis de la penosa situación que siguió a los *pogroms* de 1391; algunas de las más importantes aljamas, incluyendo la de Barcelona, desaparecieron como comunidades organizadas, y las que subsistieron quedaron muy disminuidas en número y capacidad económica. De forma correlativa aumentó el número de los verdaderos y falsos conversos, en medio de un ambiente de general hostilidad que dificultó la convivencia y preparó futuros desastres.

Le opere scientifiche di Alfonso X e l'intervento degli ebrei reproduce una comunicación de Romano en un congreso celebrado en Florencia en 1969. Se plantea en él la debatida cuestión de la intervención personal de aquel monarca en la redacción de las obras que corren a su nombre. La respuesta es matizada: en las obras literarias, históricas y jurídicas la intervención personal del rey es indudable, pero en las científicas su papel sería el de un patrocinador que reúne colaboradores con vistas a una tarea que tuvo extraordinaria importancia para la divulgación del saber científico (en lo esencial, astronómico) en Occidente, el de un coordinador que a lo sumo escribiría unos párrafos introductorios y haría correcciones literarias o estilísticas. Se destaca la importancia que los judíos, por su conocimiento del árabe y el castellano, desempeñaron en esta misión.

La transmission des sciences arabes par les juifs en Languedoc insiste en este mismo planteamiento, aunque referido a épocas anteriores a la de Alfonso el Sabio. El sur de Francia tuvo también cierta intervención en la ósmosis producida entre la ciencia árabe y la occidental; aunque no alcanzara el protagonismo que tuvieron ciudades españolas como Toledo, Zaragoza y otras. En la misma línea se encuentra el extenso artículo *El papel judío en la transmisión de la cultura*, puesta al día de un tema que, a pesar de su importancia, aún tiene aspectos mal conocidos. En los siglos centrales de la Edad Media existía en Europa una gran apetencia por los conocimientos científicos que los árabes de España (tomamos esta expresión en su sentido convencional) habían atesorado, reuniendo a la herencia helenística otros procedentes de Irán y la India. Los judíos españoles desempeñaron un papel capital en estos contactos entre Oriente y Occidente; Millás Vallicrosa profundizó en el conocimiento de estas relaciones, y su discípulo David Romano hizo de ellas uno de sus temas preferidos de investigación y divulgación. El poliglotismo de los judíos peninsulares los hacía especialmente aptos para tareas que no siempre eran estrictamente científicas; la literatura comparada también está interesada en no pocos aspectos, como ocurre en el debatido tema de las fuentes árabes de la *Divina Comedia*, tesis que Asín Palacios defendió ante un escepticismo muy generalizado hasta que el descubrimiento de un eslabón fundamental ha venido a darle la razón, aunque de forma póstuma: "El *Mi'ray* (la descripción de la milagrosa ascensión de Mahoma a los cielos) fue traducido al castellano por el judío don Abraham de Toledo con el título de *La Escala de Mahoma*. En la corte misma, el notario Bonaventura da Siena, gibelino al servicio de Alfonso X, la retradujo al francés y también al latín, y debió llevarse esta última versión a Italia. Allí fue conocida por Dante y aceptada para formar la parte fundamental de la *Comedia* dantesca."

Otros de los trabajos reunidos en este volumen se refieren a cuestiones menos atractivas, más dolorosas; al clima tenso y difícil que se vivía entre la mayoría cristiana y las minorías judía y mudéjar en los años finales de la Edad Media. David Romano las aborda con serena objetividad, sin rencor ni tremendismo, innecesario por otra parte, pues los hechos hablan por sí solos con terrible elocuencia. La idea, tan difundida, de una época de amplia tolerancia, previa a las citadas tensiones, provoca en él un escepticismo que yo comparto; refiriéndose a la situación de los judíos aragoneses en la época de Pedro IV escribe que hubo coexistencia, "pero no ens sembla que s'hagi de parlar de convivencia exceptuant casos aïllats i molt concrets" (página 471).

Junto a estos grandes temas hallamos en este corpus hechos, anécdotas que parecen intrascendentes pero ayudan a recrear una atmósfera: *Cementerios judíos de Lérida*, *Un casamentero judío*, *Cortesanos judíos en la Corona de Aragón*, *Prestadores judíos en los estados hispánicos medievales*... No es el menor de los méritos de este volumen rescatar estas páginas que de otra forma hubieran quedado virtualmente perdidas en colectáneas y revistas de escasa difusión. (A. D.)

Paleontología

Origen del hombre moderno

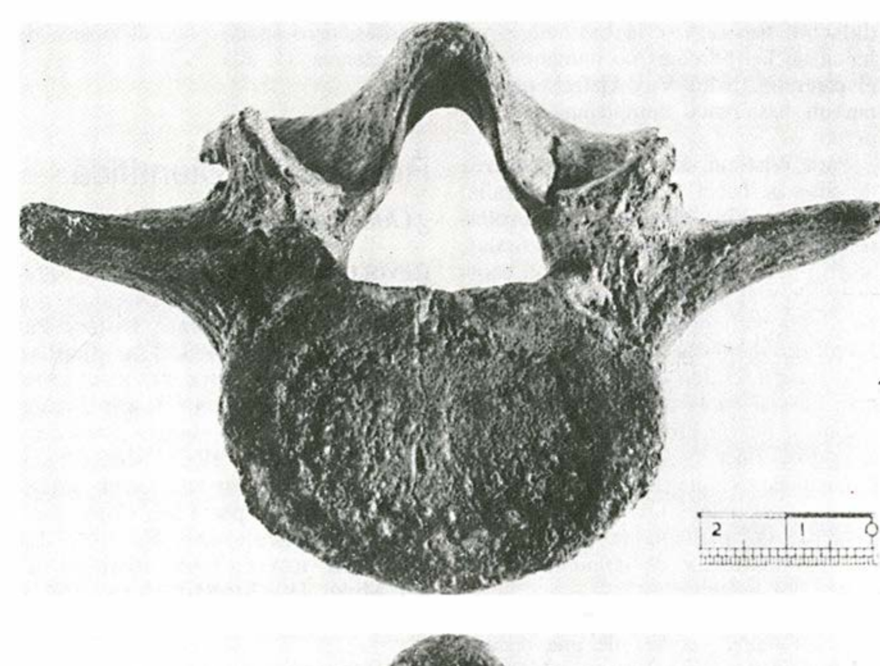
The human revolution. Dirigido por P. Mellars y C. Stringer. Princeton University Press; Princeton, 1989.

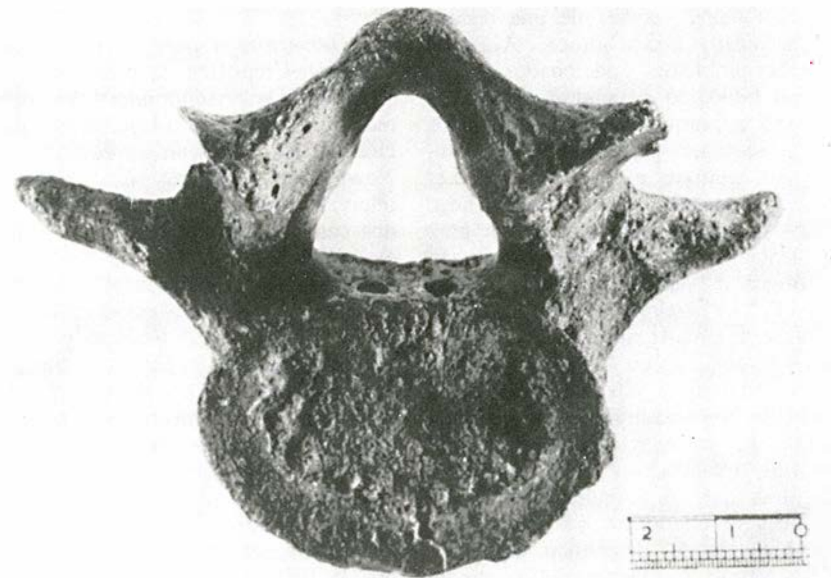
El volumen que venimos a comentar reúne los trabajos presentados en la reunión de Cambridge de mayo de 1987 y que originariamente debía constituir una sección del malogrado "World Archaeological Congress" de Southampton (1984). *The Human Revolution* es una puesta a punto sobre el tema, desde una perspectiva multidisciplinar, y en la que, además del

enfoque genético y paleoantropológico, se abordan también otros aspectos como el cultural, el etológico, el ecológico, el biogeográfico, etc. Permite, pues, hacerse una idea cabal de las distintas posiciones, sin el inevitable filtro que suponen los trabajos de síntesis debidos a terceros.

La obra se divide en tres apartados e incluye hasta 34 contribuciones originales, además de una introducción general de los editores. Con mucho, la primera sección de la obra ("Cambio biológico") es la más voluminosa y la que recoge un mayor número de trabajos. El tema central lo constituye el debate entre el modelo "Arca de Noé" y el modelo multirregional. Las pruebas genéticas las presentan Stoneking y Cann, Wainscoat y colaboradores y Lucotte. Una amplia reflexión sobre el tema es ofrecida por Shanin Rouhani. La síntesis y puesta al día del modelo multirregional corre a cargo de Wolpoll. El resto de los trabajos, hasta la decena, constituyen aportaciones a una u otra posición desde el campo paleoantropológico: Rightmire, Bräuer, Vandermeessch, Arensburg, Stringer, Habgood, Groves, Tillier y otros. Dos excepciones: Ezra Zubrow, que propone un modelo demográfico para la extinción de los neandertales, y Robert Foley, que analiza las condiciones ecológicas de la aparición del hombre moderno. Este último propone un ingenioso modelo para explicar el origen del hombre moderno por alopatría, basado en el papel de barrera zoogeográfica que periódicamente representa el Sahara.

Stoneking y Cann reafirman los datos publicados en 1987, situando el origen del hombre moderno entre 140 y 290.000 años. Sin embargo, en el resumen del artículo proporcionan unos márgenes mucho más amplios: entre 50 y 500.000 años. Por su parte, Rouhani muestra en su contribución que el modelo multirregional es "implausible", de acuerdo con las densidades de población calculadas para las sucesivas poblaciones de *Homo erectus*. Wolpoff, en un extenso artículo, matiza el contenido de su hipótesis multirregional, que no puede ser simplemente asimilada al modelo "en candelabro" que Weidenreich propusiera en los años 30. En su modelo, Wolpoff concede al flujo genético una fuerza destacada, hipótesis que Rouhani rebate por adelantado en un artículo anterior. Por lo demás, la crítica que realiza del registro fósil africano se detiene en pequeñas irregularidades (precisión de las dataciones, supuestas inexactitudes en la estratigrafía de los yacimientos, etc.) que difícilmente ponen en cuestión un acervo paleontológico que empieza a ser contundente y que cada nueva datación reafirma. La documentación fósil procede básicamente de Africa (Rightmire, Bräuer y Stringer) y del Próximo Oriente (Vandermeersch y Arensburg). Los mayores problemas desde el punto de vista paleoantropológico para el modelo del "Arca de Noé" se plantean en Australasia. Así, Habgood no reconoce la existencia de la sustitución de unas formas por otras en esa región, admitiendo la posibilidad de cierta continuidad morfológica. Para Groves no habría tal sucesión continua, sino dos procesos de reemplazamiento distintos: un primer desplazamiento de *Homo erectus* por parte de *Homo sapiens* arcaicos (representados por el cráneo de Dali) y un segundo desplazamiento, a cargo de *Homo sapiens* modernos. En la región australiana habríase dado tan sólo la más reciente.





1. Quinta vértebra lumbar del esqueleto de Kebara. La fotografía de arriba corresponde a la visión superior; la de abajo, a la vista inferior. La escala se da en centímetros.

La segunda sección de la obra, "Cambios en el comportamiento", abarca artículos de contenido dispar: zooarqueología (Chase), arqueología (Mellars, White, Dibble, Whallon) e incidencia del lenguaje en la nueva organización y en la inteligencia del hombre moderno (Alexander, Lieberman, Gellner). Dibble critica la interpretación que se hace de ciertas pruebas biológicas (asimetría cerebral) en cuanto muestran la presencia de un lenguaje avanzado, así como la relación entre industria lítica y tipo de lenguaje. El análisis realizado por Lieberman del tracto suprafaríngeo vocal en formas fósiles reviste gran interés y aporta algunos datos sorprendentes; por ejemplo, en el neandertalense de La-Chapelle-aux-Saints el grado de mo-

dulación fonética sería bastante similar al de los primates no humanos. Por el contrario, Skhul-V y Qafzeh presentan un basicráneo completamente moderno.

Para Whallon, la expansión a través de Siberia, hacia América y Australia, sólo fue posible cuando se desarrollaron nuevas estructuras socioculturales, amén de nuevas técnicas. Siberia comparte con el desierto australiano una baja densidad, diversidad y predictibilidad de recursos; por consiguiente, sólo un nuevo tipo de organización social, basada en la alianza entre grupos distintos, habría posibilitado su colonización. Gellner y Alexander proponen otros modelos, que destacan el carácter revolucionario que tuvo en el hombre moderno la aparición de nuevos tipos de organización y de comunicación a través del lenguaje.

La tercera sección de la obra, "Casos regionales", consta de una decena de artículos misceláneos. Algunos abordan problemas relacionados con el campo biológico o cultural, y uno no se explica porqué no fueron incluidos en las secciones precedentes; por ejemplo, los relativos a los restos del Levante mediterráneo (Bar-Yosef, Shea, Clark y Lindly), que tienen una gran incidencia en el debate sobre el patrón de origen del hombre moderno (multirregional o "Arca de Noé"). De todos ellos se desprende que no existe correlación entre cambio biológico y cambio cultural en la citada transición: en Palestina, tipos anatómicamente modernos aparecen todavía asociados a industrias típicas del Paleolítico medio, mientras que el neandertal de Saint Césaire se encuentra ya asociado a una industria del Paleolítico superior.

La última aportación del volumen, debida a R. Jones, nos ofrece datos de interés sobre la colonización de Australia, que debió de producirse hace unos 40.000 años.

Pese a su heterogeneidad, la lectura de esta obra nos esboza un marco congruente de los datos moleculares, genéticos, paleontológicos y culturales. Según el esquema resultante, con el hombre anatómicamente moderno surge un nuevo tipo humano, dotado de un sistema más eficaz de transmisión de información, en virtud del cual pudo desplazar a las diversas formas regionales de *Homo erectus* y a los derivados robustos del mismo (neandertales). Aunque quedan numerosas cuestiones pendientes (sobre todo, de tipo biológico), esta obra demuestra que la elaboración de patrones evolutivos para un grupo zoológico requiere ante todo un buen registro fósil y un adecuado marco biocronológico. La elaboración de hipótesis al margen de estos dos supuestos puede aumentar indefinidamente el número de páginas escritas, pero aporta poco al avance de una ciencia. (J. A.)

Revolución Científica

¿Qué pasó con la biología?

REVOLUTIONS IN SCIENCE. THEIR MEANING AND RELEVANCE. Dirigido por William R. Shea. Science History Publications; Canton, 1988. **THE MEDICAL REVOLUTION OF THE SEVENTEENTH CENTURY.** Dirigido por Roger French y Andrew Wear. Cambridge University Press; Cambridge, 1989. **MEDICINA E BIOLOGIA NELLA RIVOLUZIONE SCIENTIFICA.** Dirigido por Lino Conti. Edizioni Porziuncula; Assisi, 1989. **LA PREMIERE REVOLUTION BIOLOGIQUE,** por Mirko D. Grmek. Editions Payot; París, 1990.

El *terminus a quo* de la Revolución Científica, la publicación en 1543 del *De revolutionibus* de Copérnico, y el *terminus ad quem*, la aparición de los *Principia mathematica* de Newton en 1687, no sólo acotan un intervalo de siglo y medio de profundos cambios, sino que indican también el ámbito de los mismos, esto es, en astronomía y en física.

Pero no dejó de haberlos en el campo de la química, la biología y la medicina, entonces, como hoy, bastante interrelacionadas. Otra cosa es que hayan merecido la misma atención por parte de los historiadores. A rescatar las ideas y las figuras de ese olvido contribuyen los libros que nos proponemos comentar; y no sólo ésas. Autores hasta ahora monopolizados por la física y la matemática —Galileo, Descartes, Leibniz— comienzan a mostrarnos un perfil más acabado tras el estudio de sus incursiones en la embriología o la medicina.

Conviene, sin embargo, no perder de vista que nos encontramos con obras pioneras en muchos aspectos. Ni espere todavía el lector un cuadro completo de la biología del siglo XVII, a pesar de monografías maestras, como las de Guyénot, Roger, Bernardi, la aquí mencionada de Grmek y muchas más, que se centran, por lo común, en la fisiología y embriología. Falta aún un relato cabal de los supuestos o principios básicos, y comunes, de la botánica y zoología, no abordados, me temo, por un miedo injustificado al anacronismo. Resulta, así, que el sinfín de experimentos realizados con moscas, peces, gatos, milanos, perros, ovejas, cabras, cerdos y bovinos, para corroborar hipótesis médicas, se nos ofrezcan como recursos *ad hoc*, sin una teoría general subyacente. Lo mismo podría decirse del ascenso de la savia en las discusiones sobre las distintas clases de circulación de fluidos en el organismo humano.

Por lo que a España se refiere, es palmaria la situación de descompensación entre el prestigioso desarrollo de la historia de las ideas médicas de la época y la exangüe bibliografía biológica, no obstante los voluntariosos empeños de Colmeiro, Sanz Egaña y Font y Sagué.

La cuestión de la Revolución Científica se ha investigado desde todos los flancos. Los epistemólogos reconocen, a partir de la obra clásica de Kuhn, la necesidad de implicar la historia de la ciencia en la filosofía de la ciencia para entender las revoluciones o cambios significativos en las teorías dominantes. Transformaciones que suelen ser lentas, dándose por lo común un dilatado período de convivencia y asimilaciones mutuas entre la teoría a arrumbar y la emergente. Por eso, a modo de introducción general, hemos querido empezar por *Revolutions in science*, compendio de las conferencias dictadas, en Coimbra en abril de 1988, con motivo del simposio internacional que organizaron la universidad de la ciudad, la Unión Internacional de Historia y Filosofía de la Ciencia y el Consejo Internacional de Asociaciones Científicas.

A la hora de explicar la sustitución de las teorías goza hoy de cierto predicamento el programa estructuralista de la filosofía de la ciencia, cuyos defensores principales se aúnan en la escuela de Wolfgang Stegmüller. Las teorías, en su opinión, se integran en *redes*, mas se limitan a axiomatizar, en su análisis formal, la mecánica de Newton y, de un tiempo a esta parte, la segunda ley termodinámica. Un modelo difícilmente extrapolable a las ideas biológicas. Pero el lector interesado en metaciencia sacará provecho de esos esfuerzos, y otros parejos, en las colaboraciones de Funkestein, Frängsmyr, Pearce, Spinner y Sitter. Más ceñido a la historia real de la ciencia se mueve Pera en su estudio del caso de la controversia Galvani-Volta sobre la electricidad animal.

Tres trabajos nos llevan a la revolución biológica en su vertiente médico-química, los de Rattansi, Debus y López Piñero. El primero es un modelo de síntesis, a propósito del paracelsismo, de las sustituciones ontológicas de las "tradiciones de investigación": predominio de la explicación aristotélico-galénica, crisis de ésta en el Renacimiento, acomodaciones a los nuevos descubrimientos, pugna paracelsista y, por último, embate de la física corpuscular. Debus remacha con nuevos datos su tesis conocida de la influencia de Paracelso y sus seguidores en la revolución de la medicina, de la tera-

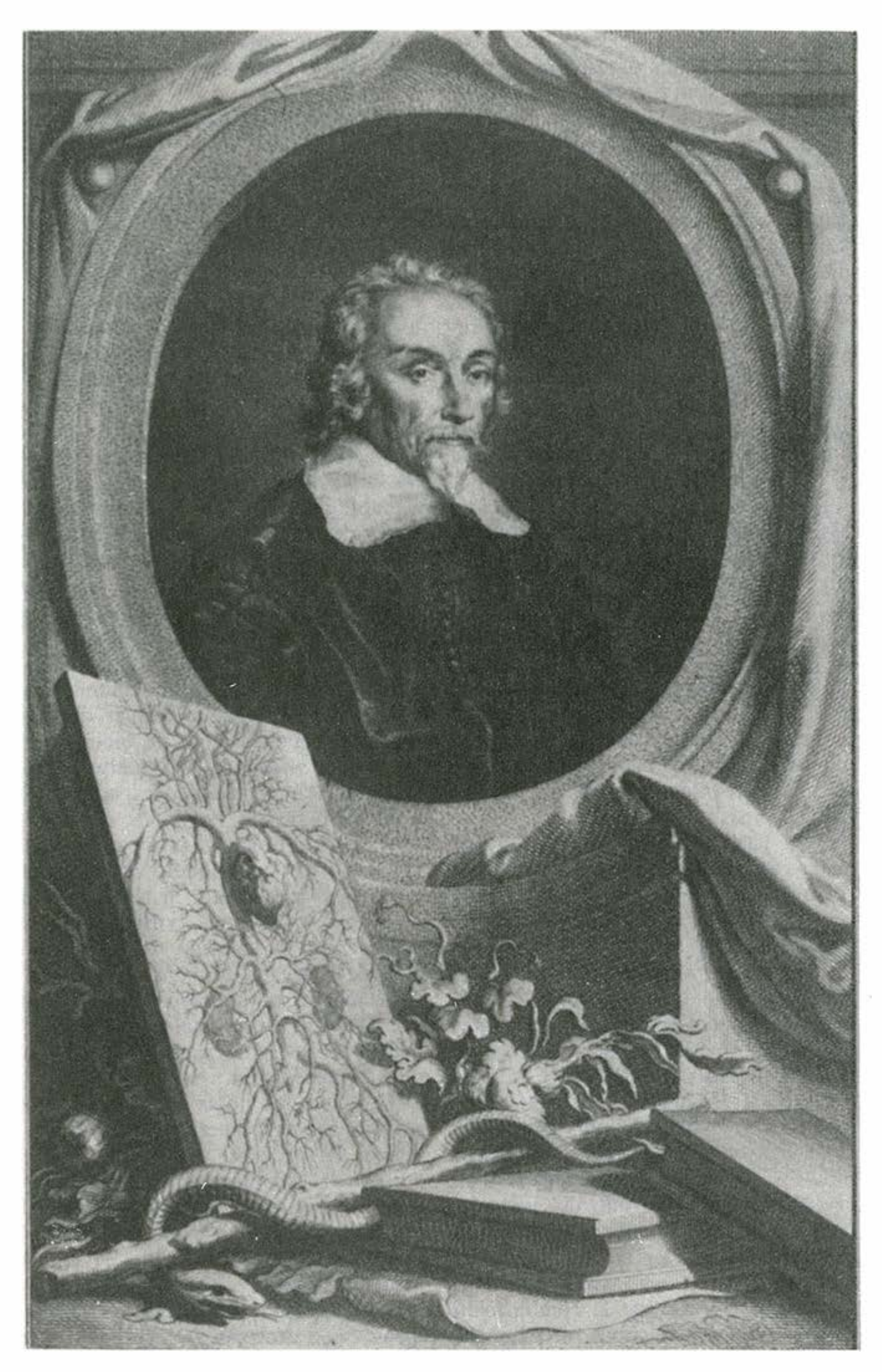
péutica en particular. López Piñero, mentor de Debus en la última parte de la colaboración de éste (de una obra del hispano dice que es el "standard monographic study"), prolonga la influencia del paracelsismo en el vitalismo del siglo XVIII. (¿Por qué omite, justamente en Coimbra, el peso de Cullen y Brown en Portugal y España, del que se ocupó hace años Arlindo Camilo Monteiro?)

¿Qué sucedió con la medicina en el tiempo de la Revolución Científica? Responder a esa pregunta, por lo que a Gran Bretaña concierne, se propone *The medical revolution of the seventeenth century*, que agavilla once artículos sobre distintos aspectos de las relaciones entre medicina, política, religión y sociedad. Roger French, hábil director de este tipo de obras corporativas (recuérdese *The medical renaissance of the sixteenth century*), ha procurado que no quedara fuera ningún tema pertinente. Confírmelo el lector en la introducción-presentación.

La historia se caracteriza por la caída de tópicos. Lugar común en la historia de la medicina del siglo XVII es la división cartográfica entre países yatrofísicos (mediterráneos) y países yatroquímicos (septentrionales). Muletilla de la historia de la medicina, y de la ciencia, de Gran Bretaña es la que otorga a los Puritanos la reforma de la iglesia, el estado, la medicina, la ciencia y "almost everything else". Viene a ser como la generalización de Jones, padre de esa tesis reformista, de la doctrina maxweberiana sobre el origen protestante del capitalismo.

No hubo, evidentemente, tal correlación "puritanismo-ciencia", y bueno es que lo confiese, casi en declaración oficial plenaria, el Instituto Wellcome, aunque la exposición más razonada la aporte Peter Elmer, de la Universidad de Evansville. La realidad fue mucho más compleja y en la configuración de la nueva medicina intervinieron fuerzas muy dispares, a extramuros muchas veces (católicos, herméticos) de la confesión estatal. Súmanse a las ideas religiosas en conflicto la oposición al intrusismo profesional, el rechazo de la nueva cosmovisión traída del continente (paracelsismo, sobre todo), el conservadurismo elitista del Colegio de Médicos, la rémora libresca de la enseñanza universitaria. Pero el vector resultante de cuantos auspiciaban la transformación del arte de curar se hallaba en el irenismo, un nuevo talante cuya doctrina quiso articular Locke en *Cartas sobre la tolerancia*, pero al que le traicionó su animosidad contra el ateísmo y el catolicismo.

La recepción en los Países Bajos de la teoría harveyana de la circulación de la sangre constituye una piedra de toque para ver el alcance de las disputas religiosas. De su aceptación, facilitada por la congruencia con las ideas médicas, sociales y políticas vigentes, así como de la fuerza del aristotelismo prístino de los calvinistas contra el cartesianismo se ocupa French, en una crítica revisión de los tejemanejes del filósofo galo para imponer su sistema.



2. William Harvey, a los setenta y ocho años. Sus escritos sobre la circulación de la sangre y la generación de los animales recapitulan el método y el contenido de la primera revolución biológica.

En la praxis médica ocupa un puesto destacado las que hoy denominamos enfermedades psicosomáticas y muchas del sistema nervioso. Depresiones y locura, en concreto, convocaban lo mismo a teólogos que a médicos, charlatanes y curanderos. Costó mucho que perdieran su estigma diabólico y buscarles, ya que no hallarles, un origen orgánico; e igual encontramos ministros secularizadores que médicos escatologistas. Otros males, la peste y las epidemias, por ejemplo, habrían de servir para el desarrollo de la medicina social, en la que militará Sydenham, y gracias en buena parte a la cual podrá esbozar su idea inductiva de la clínica médica: "Sólo la observación minuciosa de los fenómenos natu-

rales de las enfermedades... nos capacitará para hacer progresar la medicina; la vía es a través de la experimentación; el trabajo debe realizarse a través de las observaciones propias."

En la conformación de la nueva medicina inglesa es obvia la influencia de Bacon y de Newton, éste orientando sobre todo la corriente yatromecánica a la búsqueda de los "principia medicinae theoreticae mathematica". Y con Newton, la labor normativa de la Regia Sociedad, estudiada por Porter a través de la correspondencia y análisis de los "fenómenos" planteados: medidas (longitud, anchura) de la glándula hipertrofiada o valoración crítica de los remedios (mágicos y naturales).

Por otra ruta navega *Medicina e biologia nella rivoluzione scientifica*, fruto también de un simposio sobre "Personajes y problemáticas de la biología y la medicina en los siglos XVI y XVII", celebrado en la Universidad de Perugia en octubre de 1987. Carece de un hilo conductor y se divide en dos apartados un tanto forzados: la ciencia médica en los orígenes del mundo moderno y medicina y biología durante la revolución científica. Le sobran, además, infinitas erratas.

Pero hay comunicaciones rigurosas en su sencillez, como la de Michael Mönnich y Wolf-Dieter Müller-Jahncke sobre la fisiología, la terapéutica y la magia en Campanella, que lo consideran el último pensador universal del Renacimiento por su aceptación del galenismo ribeteado de interpolaciones personales (magia natural, rechazo de la sangría indiscriminada). O la nota extensa de Bernardi sobre el Galileo biólogo, promotor, en embriología, de la alianza entre atomismo y microscopio. En oposición a Aristóteles y su explicación del desarrollo del polluelo, para Galileo generación y corrupción son pura apariencia: en realidad, nada se crea ni se destruye, sino que todo se transforma a través de la combinación de una entidades mínimas preexistentes e inalterables.

Dos contribuciones tienen cierta relación con España, la de Alessandrini sobre Heckius y la Academia de los Lincei, y la de Marini-Bettòlo acerca del *Thesaurus plantarum Novae Hispaniae* de Francisco Hernández resumido por Recchi, para nosotros (Somolinos dixit) crimen nefasto, pero timbre de gloria al parecer para la cultura italiana; quizá convendría, en ese asunto, conocer mejor la aportación de Colonna. Menos comprensible resulta que Capecci haya limitado su estudio ("Mecanicismo y finalismo en la biología de A. Cesalpino") al tema de la circulación y al del aristotelismo en las *Cuestiones peripatéticas* del aretino, quien se propuso, no obstante, crear una historia natural completa: zoología (*Cuestiones*), botánica (*De plantis*) y mineralogía (*De mineralibus*).

Y llegamos a la obra más prometedora, *La première révolution biologique*. Su autor, Mirko D. Grmek, es un reconocido experto en fisiología del XVI y XVII, con estudios diversos sobre Santorio, Vidius, Baglivi, Descartes, Vieussens, Mariotte, Barbeyrac, amén de revisiones generales sobre el hipocratismo francés del reinado de Luis XIV. Ha realizado incursiones en la biología aristotélica y en la introducción del método cuantitativo en las ciencias de la vida. Creador de publicaciones periódicas, da clases de historia de la medicina y la biología en la Escuela Práctica de Estudios Superiores de París. Y superado el dantiano "mezzo del cammin della sua vita", parece, pues, la persona indicada para abordar con autoridad la naturaleza y alcance de la revolución biológica.

Distingue tres rupturas epistemológicas del paradigma. De la última a la primera: la biología molecular de mediados de nuestro siglo, la biología de la segunda mitad del XIX (darwinismo, teoría celular y medicina experimental) y la biología de mediados del siglo XVII. Esta última, la primera, supone el abandono del modelo hipocrático, aristotélico y galénico. Si tomamos por emblema a Harvey, explica Grmek, vemos que su hallazgo de la circulación de la sangre no constituye la culminación de un proceso gradual, sino una absoluta innovación; el "todo" nuevo no es la suma de las "partes" que le precedieron.

Tres son las notas definitorias que singularizan la primera revolución biológica. La primera, y principal, el recurso a la experimentación cuantitativa con animales; la segunda, el papel heurístico de la concepción mecanicista de la vida, y, la tercera, la praxis médica reformada. Notas que se desarrollan en las tres partes correspondientes que componen el libro. Lo que Grmek escribe sobre la medicina científica en Francia puede parangonarse con lo expuesto en la obra dirigida por French y Wear en Gran Bretaña, con el añadido de una glosa sobre la reforma de la enseñanza y la praxis del arte en Leibniz.

Opina que no hubo método experimental, *sensu stricto*, antes del XVII. Para reafirmarlo abunda en el análisis de los textos supuestamente cuantitativos de hipocráticos, pitagóricos, aristotélicos y galénicos de Grecia, Magna Grecia y Alejandría, y llega a la conclusión de que son puramente cualitativos. No existe para él la Edad Media, y por consiguiente orilla la genuina investigación biológica de Alberto Magno y la teoría de grados del galenismo árabe. Tras un examen, a lo Marañón sobre el Conde Duque, de la personalidad clínica de Galileo, se detiene en el uso de los instrumentos de medición y experimentación (en particular, de la escala de la temperatura en Santorio y otros yatrofísicos), para acabar en Harvey, cuya teoría arruina los conceptos fundamentales vigentes todavía en Padua: sustitución de las ideas de flujo y reflujo por la de circulación, diseminación continua de materia y calor por la noción de su conservación, fuerza de atracción por la de propulsión y dualidad de sistemas vasculares por una disposición hemodinámica unificada.

Entiende la concepción mecanicista de la vida de acuerdo con lo propuesto por nuestro Gómez Pereira en *Antoniana Margarita* y la doctrina cartesiana similar, que prosigue especificada en la doctrina fibrilar y concluye en una espléndida reconstrucción de la polémica sobre la percepción visual, protagonizada por Mariotte y Pecquet. Es una lástima que reduzca la biología mecanicista a los modelos animales, cuando podía haber encontrado ejemplos más sólidos en botánica, donde las referencias geométricas, piénsese en la filotaxis, y las simulaciones mecánicas (succión de los nutrientes y ascenso de la savia) eran cuestiones debatidas, aunque la historia de la biología no les haya prestado todavía la atención obligada. (L. A.)

Filosofía de la ciencia

Florilegio

THE PHILOSOPHY OF SCIENCE. Dirigido por R. Boyd, Ph. Gasper y J. D. Trout. The MIT Press; Harvard, 1991.

La filosofía de la ciencia se encuentra en un momento de reflexión sosegada, después de los turbulentos tiempos iniciados hace algo más de seis décadas. En 1929 aparecía el opúsculo pragmático de la fundación del Círculo de Viena, que tenía por autores a Rudolf Carnap, Hans Hahn y Otto Neurath. Con él se iniciaba una nueva corriente de pensamiento acerca del valor objetivo del método científico. A este círculo se incorporaron otros pensadores: Moritz Schlick, Herbert Feigl, Hans Reichenbach, etc.

Su nueva concepción de la ciencia, que se llamó "positivismo lógico", excluía, o quería excluir, del conocimiento científico toda clase de metafísica. Este fue su principal punto de partida que confesaron abiertamente sus fundadores. Por aquel entonces Karl Popper elaboró también una teoría propia sobre lo esencial del método de las ciencias con su célebre obra *La lógica*

de la investigación científica, que se publicó en 1934 en parte bajo los auspicios del Círculo vienés, pero que no respondía exactamente a aquella filosofía. De ahí que, en sendos artículos de 1935, Neurath y Reichenbach criticaron la obra popperiana como incompatible con las ideas del Círculo. Popper, en efecto, defendía el valor de una metafísica, aunque tampoco coincidía con la más tradicional. Las ideas del Círculo de Viena extendieron su influencia a muchos ambientes, pero también adquirió difusión el libro de Popper, con más éxito del que él mismo, según confiesa, esperaba. Todo ello dio origen a un movimiento de revisión de los postulados de la ciencia positiva, no ya de la matemática, hecha años atrás. Y mientras, por ejemplo, Alfred Ayer divulgaba en Inglaterra entusiásticamente las concepciones de los vieneses, también hubo quien se oponía decididamente a ellas, refugiándose en ideas más conservadoras, o bien aceptando la filosofía popperiana como base de la ciencia. Los escritos polémicos sobre el tema fueron incontables.

Hoy día, ya más calmados los ánimos, es posible hacer un balance de lo dicho sobre el tema. A esto responde la obra editada por Richard Boyd, Philip Gaspers y J. D. Trout, *The Philosophy of Science*. Se trata de una antología de textos escogidos entre los que los editores consideran más significativos sobre el asunto, escritos en los últimos sesenta años. En un total de 41 capítulos están representados treinta y seis autores. Algunos tienen más de un capítulo. En realidad los "capítulos" no son más que artículos o fragmentos de obras más extensas, agrupados por temas. La recopilación se divide en dos partes: la primera aborda las cuestiones generales comunes a todas las ciencias, la segunda contempla algunas ciencias en particular.

La primera parte comprende tres secciones: 1: confirmación, semántica e interpretación de las teorías científicas (15 capítulos); 2: causalidad y explicación (5 cap.); y 3: reduccionismo y unidad de la ciencia (4 cap.). La segunda parte expone opiniones referentes a cuatro ciencias: física (5 cap.), biología (3 cap.), psicología (5 cap.) y ciencias sociales (4 cap.), de modo que son cuatro las secciones de esta segunda parte. Los editores han añadido un ensayo introductorio a cada una de las siete secciones en que queda dividido el libro; una a cargo de Boyd, tres obra de Gasper y tres de Trout. Estos ensayos sitúan históricamente el debate contenido en los capítulos que le siguen.

La obra nos da a conocer la evolución histórica del pensamiento científico-filosófico desde el nacimiento del positivismo lógico, con su difusión y posterior declive, hasta la aparición gradual de un cierto consenso acerca de los principales puntos que fundamentan el valor de la ciencia. La obra tiene, pues, un gran interés y su consulta se hará imprescindible a todo aquel que quiera conocer la historia del pensamiento contemporáneo acerca de la fundamentación de las ciencias. Es también una amplia introducción muy útil para tener una base para la comprensión de cualquier tratado actual de la filosofía de la ciencia.

Esta antología tuvo, como nos advierten los mismos editores, su precedente en los *Readings in the Philosophy of Science* (1953). Pero, como el tiempo pasa, el compendio necesitaba ser puesto al día, ya que desde 1953 se ha escrito mucho más sobre el tema y nuevas tendencias han aparecido, como las englobadas con el nombre de "pospositivismo". Pero la obra que reseñamos no se ha limitado a una labor actualizadora. Ha hecho más: ha elaborado una colección nueva en muchos aspectos, incluyendo textos anteriores a 1953 que, a juicio de los editores, no se podían excluir del conjunto.

Ahora bien, toda antología requiere echar mano de una selección. Y toda selección se hace siempre, en gran parte, con criterios subjetivos. Así, ésta peca de cierta parcialidad: los textos escogidos pertenecen en su mayoría al mundo anglosajón, que la hacen incompleta en algunos aspectos y en otros prolija. No se han omitido los textos más representativos: el de Moritz Schlick sobre "Positivismo y Realismo" (publicado en *Erkenntnis*), los de Rudolf Carnap sobre "Empirismo, Semántica y Ontología" (capítulo de su *Meaning and Necessity*) y sobre los fundamentos lógicos de la unidad de la ciencia (que forma parte de la *International Encyclopedia of Unified Science*), capítulos nucleares de *La lógica de la investigación científica* de Popper, un texto de Thomas Kuhn sobre las revoluciones científicas, selecciones de *The Philosophy of Space and Time* de Hans Reichenbach, etc. Pero al lado de ellos aparecen —repetimos, a nuestro juicio— otros de menor relevancia, como por ejemplo el capítulo de Evelyn Fox Keller sobre "Feminismo y Ciencia". Y se echan de menos autores como I. Lakatos, J. Hintikka, I. Niiniluoto, W. Stegmüller, A. Grünbaum o M. Bunge, que uno esperaría encontrar en una antología del volumen de la que reseñamos, a causa de su contribución no despreciable en la materia que nos ocupa.

Hecha esta salvedad, digamos que la obra es de innegable utilidad para cualquier estudioso de la filosofía o de la ciencia, imprescindible, sobre todo, de figurar en la biblioteca de un profesor de filosofía de la ciencia. (F. N.)

Botánica

Gimnospermas

PINACEAE, por Aljos Farjon. Regnum Vegetabile, vol. 121. Koeltz Scientific Books; Königstein, 1990.

Esta obra es una revisión y puesta al día del conocimiento de diez géneros de plantas (*Abies*, *Cedrus*, *Pseudolarix, Keteleeria*, *Nothotsuga*, *Tsuga*, *Cathaya*, *Pseudopsuga*, *Larix* y *Picea*) de la familia de las Pináceas.

Se inicia con una descripción de la familia tratada. Se comentan las clasificaciones de las subfamilias que de la misma se han propuesto, utilizando diferentes características. La propuesta del autor queda reflejada en un dendrograma que contiene las interrelaciones de los once géneros, elaborado a partir de una matriz con 25 atributos binarios. Predominan las características morfológicas, centradas en los órganos reproductores (diez corresponden a las piñas), frente a otras vegetativas (tres a las hojas). Es una lástima que no se haya realizado una lectura evolutiva de estos caracteres y no aparezcan después detallados al tratar las especies.

Se reconocen 9 regiones florísticas a partir de las áreas actuales en que se encuentran los diferentes géneros.

Contiene una clave de las subfamilias y de los géneros tratados. Se describe el género y dentro del mismo se realiza una clasificación de las secciones que incluye, una descripción de las mismas y una clave que desciende hasta la especie u otro rango de tipo infraespecífico reconocido; además se describe la ecología y la distribución del género. Dentro de cada especie se da el nombre latino y los sinónimos más frecuentes, el nombre vulgar; se la describe, se la ubica en ecología y se da su distribución mundial.

Para cada género se sigue el mismo esquema hasta completar los 10 abordados, se excluye el género *Pinus*, el más complejo por presentar un número muy elevado de especies.

La obra concluye con un estudio de anatomía foliar. A partir de secciones foliares transversales se obtienen los suficientes caracteres de microanatomía para discernir no sólo géneros, sino también especies. Hubiese sido sumamente útil una clave dicotómica para identificar las diferentes especies. También hubiese sido muy revelador establecer comparaciones acerca de la bondad del cladograma del inicio de la obra y su correlación con los caracteres anatómicos de las secciones foliares.



3. Pinsapo (Abies pinsapo) *de la Serranía de Ronda.*

Estamos ante una síntesis global de estos 10 géneros de Pináceas, en donde destacan las magníficas 112 ilustraciones a toda plana, espectaculares. Las descripciones son exhaustivas y modélicas. Pero en los mapas de distribución, para algunas de las especies, compartiendo las que tienen un carácter relíctico (*Abies pinsapo*, *Abies numidica* y otras) dibujan unas áreas mucho más dilatadas que las reales.

El tratamiento taxonómico es correcto, aunque en algún punto discutible. Así ocurre con *Abies maroccana*, que queda muy infravalorado al reputarse variedad y colocarse al mismo nivel que la varieda *tazaotana*, poblaciones estas últimas que entran dentro de la variabilidad del *A. maroccana*, ya que no presentan suficientes características morfológicas para poder ser diferenciadas.

Aunque no se puede pretender que un libro deje trillado todo el tema que aborda, sí hay algo que llama la atención por su ausencia: faltan el ciclo vital y la fenología de las especies. De algunos incluso se pueden deducir en parte del estudio detallado de las ilustraciones. Este es el caso del período de duración de las hojas, que en *Abies alba* es superior a 3 años, superior a 6 en *Abies maroccana*, o 3 años en *A. nephrolepis*. Conocer la época de formación y maduración de las piñas y de los piñones hubiese sido de gran interés, así como indicar su peso. Ello no invalida el rigor científico de esta obra fundamental para el estudio de las gimnospermas. (A. R.)

Euclides

Elementos

EUCLIDES DE ALEXANDRIA. LES ÉLÉMENTS, vol. I. Introducción general de M. Caveing. Traducción y comentario de B. Vitrac. París; PUF, 1990.

Los *Elementos de Euclides* (ca. 300 a.C.) pasan por ser el texto más difundido e influyente de la cultura occidental, detrás de la Biblia. Es un puesto de honor indiscutible, si la difusión y la influencia las medimos por el número de ediciones, traducciones y paráfrasis que un texto genera. Esta popularidad de los *Elementos*, sin embargo, no responde a razones obvias. Los *Elementos* son un texto de matemáticas que no hace otra concesión al lector que la de suponerle inclinado a valorar (en cuanto a la forma) la claridad, concisión y rigor expositivos, y (en cuanto al fondo) las cadenas deductivas rigurosamente organizadas en las que cada resultado se sostiene o bien en una verdad autoevidente, o bien en un teorema cuya verdad se ha probado anteriormente. Hay que reconocer que pocos textos consiguen encarnar el ideal filosófico del conocimiento verdadero: conocimiento de algo no trivial pero de cuya verdad es imposible dudar. Incluso para el lector moderno los *Elementos* tienen una extraordinaria fuerza apodíctica.

Durante casi dos mil años, de Aristóteles a Newton, la filosofía, incluyendo la filosofía natural, se adaptó al esquema metodológico que Imre Lakatos oportunamente llamara “un programa de trivialización del conocimiento”. De acuerdo con este programa, coherente y convincentemente defendido por Aristóteles, todo conocimiento teórico digno de este nombre debía basarse en unos axiomas cuyo contenido de verdad fuera indisputable, i.e. fueran autoevidentes. Las demás verdades debían ser obtenidas a partir de estos axiomas, o a partir de otras verdades ya probadas, por medio de reglas de deducción que eran, asimismo, obviamente válidas. Todo el edificio de verdades científicas descansaba en un pequeño número de verdades y reglas de razonamiento que, por obvias, no necesitaban justificación. Este esquema metodológico dejó de dominar el pensamiento filosófico en el siglo XVII, pero continuó siendo la filosofía de una abrumadora mayoría de matemáticos hasta, por lo menos, David Hilbert. Gran parte del valor emblemático y del atractivo extramatemático de los *Elementos* de Euclides resultan del carácter de paradigma perfecto, inatacable en ningún aspecto lógico importante.

La distancia entre contexto intelectual de los *Elementos* (la cultura clásica en su período alejandrino) y el nuestro impone una distancia conceptual considerable entre los *Elementos* y nuestras matemáticas. Los *Elementos*, por ejemplo, establecen una rígida distinción entre conceptos numéricos y conceptos geométricos. En los *Elementos* las magnitudes geométricas (líneas, superficies, etc.) no son numéricas en ninguno de los sentidos habituales del término. Dos líneas pueden ser tomadas una a continuación de la otra, lo cual constituye una operación de alguna forma equivalente a la suma, pero no existen en los *Elementos* operaciones directa y explícitamente equivalen-

tes al producto o a la potenciación — ni *a fortiori* operaciones equivalentes a la división y la radicación.

El carácter anumérico de las magnitudes geométricas euclídeas tiene infinidad de consecuencias. Euclides nunca calcula áreas ni volúmenes. Por ejemplo, que "los círculos son proporcionales a los cuadrados construidos sobre sus radios" es la formulación más próxima de nuestro resultado $A = \pi r^2$. La consecuencia tal vez más llamativa de esta geometría desprovista de valores numéricos es que obliga a introducir una noción muy sofisticada de razón o proporción entre dos magnitudes. Cuando las magnitudes pueden ser multiplicadas y divididas (dando como resultado otras magnitudes de la misma clase), la razón entre dos magnitudes A y B se define como el cociente A/B, y la proporcionalidad A:B = C:D equivale a la igualdad de los productos cruzados, A.C = B.D. Faltándole estos recursos, Euclides deja sin definir el concepto de razón entre dos magnitudes, e introduce la igualdad entre dos razones por medio de los famosos equimúltiplos de la definición 5 del Libro V: Diremos que las razones A:B y C:D son iguales cuando para cualesquiera n y m (enteros positivos), si nA es mayor, igual, o menor que mB, entonces nC también es, respectivamente, mayor, igual, o menor que mD. "Se dice que unas magnitudes tienen la misma proporción, de la primera a la segunda como de la tercera a la cuarta, cuando, si tomando cualesquiera equimúltiplos de la primera y la tercera, y cualesquiera equimúltiplos de la segunda y la cuarta, los primeros equimúltiplos de la misma forma exceden, igualan, o son menores, que los últimos equimúltiplos, tomados respectivamente en el orden correspondiente." Esta definición, junto a la teoría general de la proporcionalidad (expuesta en el Libro V) y su aplicación a la geometría plana (en el VI), ha despertado la admiración de los lectores de Euclides.

La edición de M. Caveing (autor del largo ensayo introductorio y supervisor de la traducción) y de B. Vitrac (autor de la traducción y el aparato crítico que la acompaña) viene a llenar una notable laguna en la historiografía francesa de la ciencia. La única versión francesa moderna del texto de Euclides citada por Caveing y Vitrac parece (faltándole a su edición una bibliografía general) ser la venerable traducción publicada por F. Peyrard en 1819. La laguna es paradójica, habida cuenta del papel prominente que la cultura francesa otorga a las matemáticas, y lo es tanto más cuanto que la historia de las matemáticas —baste recordar a R. Dugas, P. Costabel, J. Itard, R. Taton, entre otros— ha sido una de las especialidades de la historia de la ciencia más brillante y fructíferamente cultivadas en Francia. Yo conozco sólo otra versión moderna, la bilingüe greco-francesa de G. J. Kayas, la cual, sin apenas aparato crítico, fue publicada por el C.N.R.S.

Los *Elementos* de Caveing-Vitrac se repartirán en cuatro volúmenes. El primero de ellos, el único aparecido hasta el momento, contiene el ensayo introductorio y los cuatro primeros libros de los *Elementos*, los cuales constituyen un subconjunto natural del texto euclídeo. Como es sabido, los *Elementos* se reparten en 13 libros, o partes. Los cuatro primeros contienen los resultados generales básicos de la geometría plana, incluyendo numerosos resultados relativos a triángulos y paralelogramos. Hay que destacar entre ellos el teorema llamado de Pitágoras y la construcción de polígonos regulares. Los autores anuncian que el contenido de los restantes volúmenes se adaptará al de la edición estándar del texto griego, también en cuatro volúmenes, realizada por I. L. Heiberg en 1883-85.

El texto euclídeo se acompaña de un comentario crítico y una serie de cortos ensayos monográficos intercalados entre los cuatro libros. En estos ensayos Vitrac se ocupa, entre otras cosas, del debate sobre la llamada álgebra geométrica griega (al que volveremos después), de las diferentes clases de líneas contempladas por los matemáticos griegos, de la teoría de las paralelas, de la figura y escuela de Pitágoras, y de los distintos conceptos de igualdad manejados en los *Elementos*. Incluyen tablas que explicitan los principios (axiomas, postulados o definiciones) o proposiciones en los que basa la demostración de todas las proposiciones de cada uno de los cuatro primeros libros. También agregan algunas de las cadenas deductivas más complejas contenidas en estos libros.

En relación a la edición de Peyrard de 1819, a la que ha de substituir, la presente versión es incomparablemente mejor. Aquélla, para empezar, carecía de aparato crítico. Por otra parte, a pesar de que Peyrard presumiera de presentar unos *Elementos* "traducidos literalmente según un manuscrito griego muy antiguo desconocido hasta el presente" (hoy sabemos que es del siglo X), lo cierto es que sólo lo utilizó para corregir en determinados puntos el texto griego que se venía utilizando desde principios del siglo XVIII como versión básica de los *Elementos*. Además, esta versión no es literal, ni fiel, según los estándares editoriales de hoy. Por ejemplo, convirtió las "líneas que subtienden un ángulo" en "lados opuestos" al ángulo; párrafos enteros que consideró redundantes desaparecieron de su versión, etc. Por contraste, Vitrac nos ofrece un texto depurado y elegante, fiel al espíritu de los *Elementos*.

La versión inglesa de Thomas L. Heath es referencia obligada al reseñar una edición de los *Elementos* en una lengua moderna. Sacando partido del esfuerzo erudito de Heiberg y de los grandes filósofos de la segunda mitad del XIX, de su propio profundo conocimiento de las matemáticas griegas, así como de su competencia matemática, Heath publicó en 1908 una versión magistral que, excepto para la crítica textual, se ha convertido en la edición canónica de los *Elementos*. El aparato crítico de Heath, que incluye el texto griego de todas las definiciones, postulados, axiomas, y de cualquier expresión o frase de interpretación controvertida, ilumina los problemas de interpretación del texto. Al mismo tiempo, el comentario de Heath dilucida los problemas matemáticos y lógicos que afectan a los *Elementos*. La presente versión francesa está a la altura filológica de la de Heath, pero la comparación le resulta desfavorable desde el punto de vista de la historia de las matemáticas. Por una parte, el historiador de las matemáticas echará en falta alguno de los comentarios de Heath, o alguno de los materiales que incluyó en su edición (muchos de ellos son incorporados en la versión francesa, dando a Heath su debido crédito). Por otra, Caveing y Vitrac no han sacado todo el partido posible de las importantes contribuciones a la historia de las matemáticas posteriores a la edición de Heath. Muchas de estas contribuciones son citadas en notas al pie, pero los autores no las han utilizado para repensar los *Elementos* y hacérnoslos ver bajo una luz distinta.

En muchas ocasiones da la impresión de que Caveing y Vitrac han presentado a Euclides dejándose guiar por el interés del filólogo, del filósofo y del matemático, en detrimento del interés del historiador. En conjunto, el aparato crítico de la presente edición no agota ni teóricamente ni historiográficamente muchos de los temas que aborda. Por ejemplo, el tratamiento del Euclides medieval es más erudito que propiamente histórico, esto es, presta más atención a la descripción de manuscritos que a las modificaciones matemáticas introducidas en el texto euclídeo por los traductores medievales; así, por ejemplo, los autores dejan de citar artículos tan importantes sobre este tema como los de Mudoch y Molland. *Mutatis mutandis*, algo parecido puede decirse acerca de otros temas. Al presentar la oposición análisis-síntesis, que es importante para entender la filosofía de las matemáticas de la época clásica, los autores tampoco citan el trabajo clásico de Mahoney. (A. M.)

Apuntes

Se ha creado un nuevo método, fundado en la reacción en cadena de la polimerasa, de análisis directo de loci polimórficos de minisatélites que habrá de revolucionar la identificación de los individuos. Aporta información inequívoca del ADN del sujeto. Si su valor en medicina forense es obvio, no resulta menor para crear bases de datos de ADN con fines investigadores. Los minisatélites son regiones hipervariables del genoma cuyo polimorfismo obedece a las diversas repeticiones en tándem de una secuencia corta.

Para muchos, el temido efecto de invernadero es sinónimo de la creciente emisión de dióxido de carbono a la atmósfera que conlleva la vida moderna. En ello se ha centrado incluso la legislación de los países avanzados. Más dominable resulta, parece ahora, limitar la liberación de metano, que frena también el calentamiento global; basta para ello mejorar las instalaciones (mineras por ejemplo) y sacarle mayor rendimiento a las explotaciones (forestales, agrícolas y ganaderas).

Para los humanistas, *in veteribus sapientia*; para los matemáticos, en Gauss. En éste se inspiraron Bolyai y Lobachevskii para el descubrimiento de la geometría no-euclideana, Cauchy para su trabajo sobre el análisis complejo y Jacobi para establecer su teoría de las integrales elípticas. Y, por lo que acaba de saberse, también la aplicación del conjunto de Mandelbrot a la dinámica compleja, en concreto la idea innovadora del alemán de la media aritmético-geométrica, una suerte de combinación entre la media aritmética (la media de dos números es su semisuma) y la media geométrica (que es la raíz cuadrada de su producto).

Pertenece a la cultura general el espaldarazo que Arthur Eddington dio a la teoría de la relatividad einsteniana, cuando comprobó en el eclipse total de 1919 que la curvatura del espacio por la acción de la gravedad solar dispersaba la luz procedente de una estrella lejana. Los astrónomos repitieron el experimento el año pasado y midieron la deflexión de ondas de radio (emitidas por la galaxia remota P0201+113), a su paso por la vecindad de Júpiter. Si el efecto observado por Eddignton era de 1,75 segundos de arco, la deflexión de Júpiter es de 17 segundos de arco.

La investigación, se ha repetido hasta la saciedad, tiene mucho de pesquisa policíaca. Sólo le falta el Poirot que sepa seguir la pista sutil, como la de ciertos braquiópodos, verosímiles denunciantes de cambios climáticos. A lo largo de los últimos 10.000 años, *Terebratulina retusa* ha viajado desde las islas Canarias hasta Spitzbergenz. Por contra, *T. septentrionalis*, amante del frío, medra entre Groenlandia y la isla Baffin, aventurándose sus larvas hasta el sur y este del Canadá, transportadas por la corriente del Labrador; pero se han hallado poblaciones relictas supervivientes en Finlandia y Noruega. Ello indicaría que se produjo, en las postrimerías de la edad del Hielo, una rápida emigración hacia el norte de la especie *T. retusa* a expensas de su congénere, y que la dispersión de las larvas de braquiópodos podría guardar el mapa de las corrientes oceánicas en un pasado remoto.

La picaresca académica mantiene en una tradición no escrita que copiar de un trabajo es plagio; de dos es cita; de tres centón, y de cuatro investigación. Con la avalancha de publicaciones y el fácil acceso a las mismas en los bancos de datos, ese feo engrose del currículum se ha multiplicado, sólo en los Estados Unidos, por 16 a lo largo de los dos últimos años. Cogido recientemente *in fraganti* cierto profesor de ingeniería eléctrica, alegó en su descargo que, si bien había copiado de dos trabajos, su método era nuevo; la verdad resultó mucho más bochornosa: tomó la introducción y la definición del problema de uno y lo unció a la presentación del método del otro.

Los astrónomos han trenzado sus hipótesis sobre la formación de galaxias apoyándose en la observación de los objetos más remotos conocidos, que, se supone, corresponden a un universo más joven. Recientes mediciones de desplazamiento hacia el rojo de la muestra más débil —perteneciente a un cosmos de unos 3000 o 4000 millones de años— denuncian la sobreabundancia de enanas azules. Ello, de confirmarse, significa que la población de galaxias ha evolucionado mucho más deprisa de lo que se venía suponiendo.